

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Řídicí jednotka pulzního měniče**  
**Control Unit for DC-DC Converter**

**2019**

**Štěpán Kirschner**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Štěpán Kirschner**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612R003 Aplikovaná elektronika  
Téma: **Řídicí jednotka pulzního měniče**  
**Control Unit for DC-DC Converter**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište stávající výkonovou část pulzního měniče a specifikujte požadavky na řídicí část.
2. Navrhněte a realizujte mikroprocesorovou řídicí jednotku měniče.
3. Ověřte správnou funkci realizovaného řízení pro všechny požadované režimy činnosti pulzního měniče.

Seznam doporučené odborné literatury:


Vondrášek, F.: Výkonová elektronika Svazek 3, část 1: Pulsní měniče. Západočeská univerzita v Plzni, 2012  
Pinker, J.: Mikroprocesory a mikropočítače. BEN - technická literatura, 2004


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018  
Datum odevzdání: 30.04.2019



  
doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

*Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.  
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal*

V Ostravě dne 30.4.2019

Kišku

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Tomáši Pavelkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a užitečné rady v průběhu návrhu a realizace bakalářské práce, panu Ing. Martinu Sobkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při softwarovém řešení bakalářské práce a panu Ing. Danielu Kouřilovi za vstřícnost při výrobě praktické části bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Náplní této bakalářské práce je návrh a realizace nové řídicí jednotky pro stávající dvoukvadrantní pulzní měnič. Součástí práce je zároveň i návrh a realizace nového uživatelského rozhraní pro ovládání měniče. Práce má za účel zkvalitnění výuky předmětu Výkonové polovodičové systémy obohacením o v současnosti nefunkční dvouhodnotové řízení pulzního měniče. S ohledem na potřebu komunikace s uživatelským rozhraním i vícero požadovaných způsobů řízení a režimů měniče, je nejvhodnější mikropočítačové řešení řídicí jednotky. Algoritmus pro řídicí program vychází z požadavků na řízení, uživatelské rozhraní i kompatibilitu se stávající výkonovou částí měniče a jejími obvody buzení a blokování.

## **Klíčová slova**

Dvoukvadrantní pulzní měnič, mikropočítač, dvouhodnotové řízení, řízení s konstantní spínací frekvencí, výkonové součástky

## **Abstract**

The contents of this bachelor thesis are the design and the realization of the new control unit for current two-quadrant DC converter. One part of the thesis is also the design and the realization of the new user interface for controlling converter. Purpose of the thesis is improvement teaching in subject Power Semiconductor Systems by enrichment converter with two-valued management, which is actually unfunctional. The best solution is the microcontroller control unit due to the need of communication with the user interface and multiple management modes. The algorithm for controlling program is based on requirements for controlling, user interface and compatibility with an actual power unit of converter and its excitation and the blocking circuits.

## **Key words**

Two-quadrant DC converter, microcontroller, two-valued management, management with constant switching frequency, power components

## Obsah

<b>Seznam použitých symbolů a zkratk.....</b>	<b>6</b>
<b>Seznam ilustrací.....</b>	<b>7</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>8</b>
<b>1. Specifikace pulzního měniče pro laboratorní úlohu.....</b>	<b>9</b>
1.1 Pulzní měnič pro snižování napětí.....	9
1.2 Pulzní měnič pro zvyšování napětí.....	11
<b>2. Stávající výkonová část pulzního měniče.....</b>	<b>13</b>
2.1 Vstupní usměrňovač a meziobvod.....	13
2.2 Spínací prvky pulzního měniče.....	15
2.3 Brzdny odpor.....	16
2.4 Měření proudu zátěže.....	17
2.5 Jištění měniče.....	18
<b>3. Požadavky na řídicí část.....</b>	<b>19</b>
3.1 Blokovací a budicí obvody měniče.....	20
<b>4. Návrh řídicí jednotky měniče.....</b>	<b>22</b>
4.1 Mikropočítačový řídicí systém.....	22
4.2 Uživatelské rozhraní měniče.....	25
<b>5. Programové vybavení řídicí jednotky.....</b>	<b>27</b>
5.1 Řízení s konstantní spínací frekvencí.....	28
5.2 Dvouhodnotové řízení.....	31
<b>6. Ověření funkčnosti řídicí jednotky měřením.....</b>	<b>36</b>
6.1 Ověření řízení s konstantní spínací frekvencí.....	37
6.2 Ověření dvouhodnotového řízení.....	38
<b>Závěr.....</b>	<b>39</b>
<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>40</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>41</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$f_s$	...	spínací frekvence [Hz]
$I$	...	referenční hodnota proudu pro dvouhodnotové řízení [A]
$ I $	...	velikost hysterezního pásma proudu pro dvouhodnotové řízení [A]
$I_{D,MAX}$	...	maximální propustný proud [A]
$I_{F,AV}$	...	střední hodnota propustného proudu [A]
$I_{FSM}$	...	maximální neopakovatelná špičková hodnota propustného proudu [A]
$I_{PN}$	...	rozsah měřeného proudu [A]
$I_{Z,AV}$	...	střední hodnota proudu zátěže [A]
$I_{Z,MAX}$	...	maximální střední hodnota proudu zátěže [A]
$N_{TMR2}$	...	předřazená frekvenční dělička Čítače/Časovače 2 [-]
$P_{tot}$	...	ztrátový výkon [W]
$q$	...	počet pulzů usměrňovače [-]
$R$	...	ohmický odpor zátěže [ $\Omega$ ]
$R_b$	...	brzdový odpor [ $\Omega$ ]
$R_{DS,ON}$	...	odpor v sepnutém stavu [ $\Omega$ ]
$R_M$	...	měřicí odpor [ $\Omega$ ]
$T$	...	doba periody spínání [s]
$T_1$	...	doba v sepnutém stavu [s]
$T_2$	...	doba ve vypnutém stavu [s]
$T_{AD}$	...	doba A/D převodu jednoho bitu [s]
$T_{DUTY}$	...	poměrná doba sepnutí [s]
$T_j$	...	teplota polovodičového přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t_k$	...	okamžik poklesu proudu na nulovou hodnotu [s]
$T_{OSC}$	...	perioda kmitání oscilátoru [s]
$T_{převodu}$	...	doba celého A/D převodu [s]
$T_{PWM}$	...	perioda PWM signálu [s]
$t_{tr}$	...	doba obnovení blokovacích vlastností [s]
$U_D$	...	napětí meziobvodu [V]
$U_{D,AV}$	...	střední hodnota usměrněného napětí [V]
$U_{DS,MAX}$	...	maximální propustné napětí [V]
$U_f$	...	fázové napětí [V]
$U_F$	...	úbytek napětí v propustném směru [V]
$U_{GS}$	...	spínací napětí pro unipolární tranzistor [V]
$U_i$	...	indukované protinapětí v zátěži [V]
$U_{KVANT}$	...	kvantizační úroveň A/D převodníku [V]
$U_R$	...	maximální závěrné napětí [V]
$U_{RRM}$	...	maximální závěrné špičkové opakovatelné napětí [V]
$U_{Z,AV}$	...	střední hodnota napětí na zátěži [V]
$V_0$	...	nulová dioda
$VT$	...	výkonový tranzistor
$z$	...	zatěžovatel [%]

## Seznam ilustrací

Obr. 1.1:	Schéma zapojení dvoukvadrantního pulzního měniče.....	9
Obr. 1.2:	Průběh napětí a proudu snižujícího pulzního měniče pro spojitý proud.....	10
Obr. 1.3:	Průběh napětí a proudu snižujícího pulzního měniče pro přerušovaný proud.....	11
Obr. 1.4:	Průběh napětí a proudu zvyšujícího pulzního měniče pro spojitý proud.....	12
Obr. 1.5:	Průběh napětí a proudu zvyšujícího pulzního měniče pro přerušovaný proud.....	12
Obr. 2.1:	Schéma zapojení výkonové části pulzního měniče.....	13
Obr. 2.2:	Převodní charakteristika LEM čidla proudu.....	17
Obr. 3.1:	Blokové schéma blokovací logiky měniče.....	20
Obr. 3.2:	Schéma zapojení budiče výkonového tranzistoru.....	21
Obr. 4.1:	Blokové schéma řídicích obvodů.....	23
Obr. 4.2:	Schéma zapojení řídicího mikropočítače.....	23
Obr. 4.3:	Blokové schéma řídicího mikropočítače.....	24
Obr. 4.4:	Schéma zapojení LCD.....	25
Obr. 4.5:	Schéma zapojení tlačítek.....	26
Obr. 5.1:	Vývojový diagram menu – nastavovací rutiny měniče.....	27
Obr. 5.2:	Vývojový diagram řízení s konstantní spínací frekvencí.....	29
Obr. 5.3:	Vývojový diagram dvouhodnotového řízení.....	32
Obr. 5.4:	Zobrazení možných zápisů výsledku A/D převodu.....	33
Obr. 5.5:	Časový cyklus převodu analogového signálu na digitální.....	34
Obr. 6.1:	Schéma zapojení pulzního měniče pro měření.....	36
Obr. 6.2:	Průběh napětí a proudu zátěže při řízení s konstantní spínací frekvencí.....	37
Obr. 6.3:	Průběh napětí a proudu zátěže při dvouhodnotovém řízení.....	38

## Úvod

Přes velký rozvoj současné technologie v oblasti řízení asynchronních i synchronních střídavých strojů je řízení a regulace stejnosměrných strojů stále nejjednodušším možným řešením. Tato skutečnost tak částečně vyvažuje nedostatky stejnosměrných strojů ve srovnání se stroji střídavými. Z toho důvodu jsou přes své zjevné nevýhody stejnosměrné stroje, zvláště pak stejnosměrné motory, stále hojně využívány v širokém spektru aplikací od největších možných výkonů, například v trakci, až po ty nejmenší, kterými jsou například malé servomotory v oblasti robotiky.

Řídit tyto stroje je možné jak analogově, tak i digitálně, přičemž v současné době je mnohem využívanější řízení digitální, konkrétně mikroprocesorové, a to z důvodu přesnosti, rychlosti, spolehlivosti i multifunkčnosti. Mikroprocesorové řízení také umožňuje velmi efektivně řídit více strojů najednou, a docílit tak například ideální EMC.

Při návrhu konkrétní řídicí jednotky je důležité znát účel a funkce řízeného zařízení, v tomto případě měniče, jeho výkonovou část, způsoby řízení, pracovní režimy i způsob buzení výkonových polovodičových součástek, a na základě těchto požadavků jednotku navrhnout ze softwarového i hardwarového hlediska.

Navrženou a následně zrealizovanou řídicí jednotku je poté zapotřebí otestovat, aby byla ověřena její funkčnost na základě všech požadovaných parametrů.

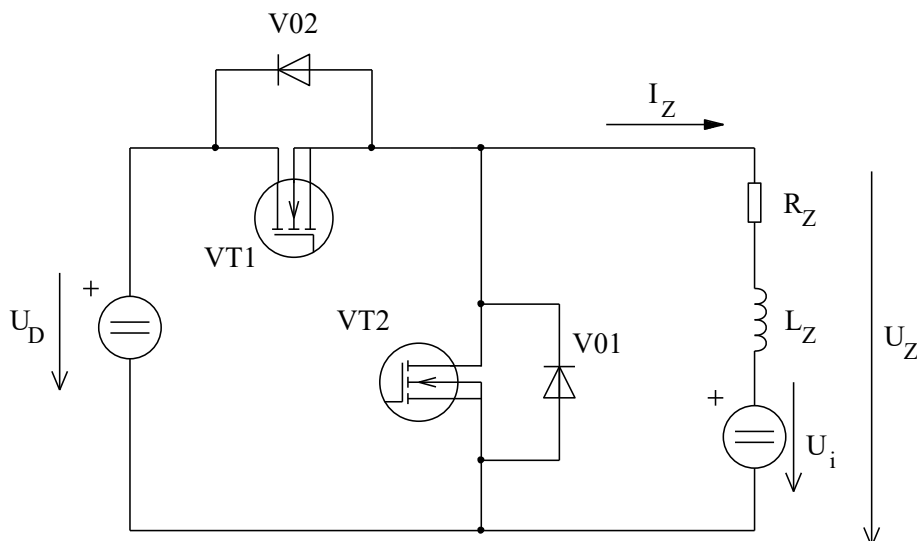
Cílem bakalářské práce je návrh a realizace nové mikroprocesorové řídicí jednotky pro laboratorní pulzní měnič. Původní řídicí jednotka musela být kvůli poruše nahrazena jinou, náhradní jednotka však nebyla navržena pro tuto konkrétní aplikaci a způsobovala nepřesnosti při měření, a navíc neumožňovala dvouhodnotové řízení měniče.

Účelem nové jednotky tedy je maximalizovat přesnost při měření na měniči, umožnit aktuálně nefunkční dvouhodnotové řízení měniče a celkově nahradit současnou, již dosluhující, řídicí jednotku. Výkonová část měniče, obvody buzení, blokování i jejich napájecí zdroj fungují korektně, není tudíž třeba tyto původní součásti měniče nahrazovat novými.



## 1. Specifikace pulzního měniče pro laboratorní úlohu

Laboratorní pulzní měnič je navržen pro režimy snižování napětí a zvyšování napětí, pracuje tedy pouze v I. nebo II. kvadrantu – při stálé polaritě napětí na zátěži je možné měnit směr toku proudu. [1]



Obr. 1.1: Schéma zapojení dvoukvadrantního pulzního měniče [1]

### 1.1 Pulzní měnič pro snižování napětí

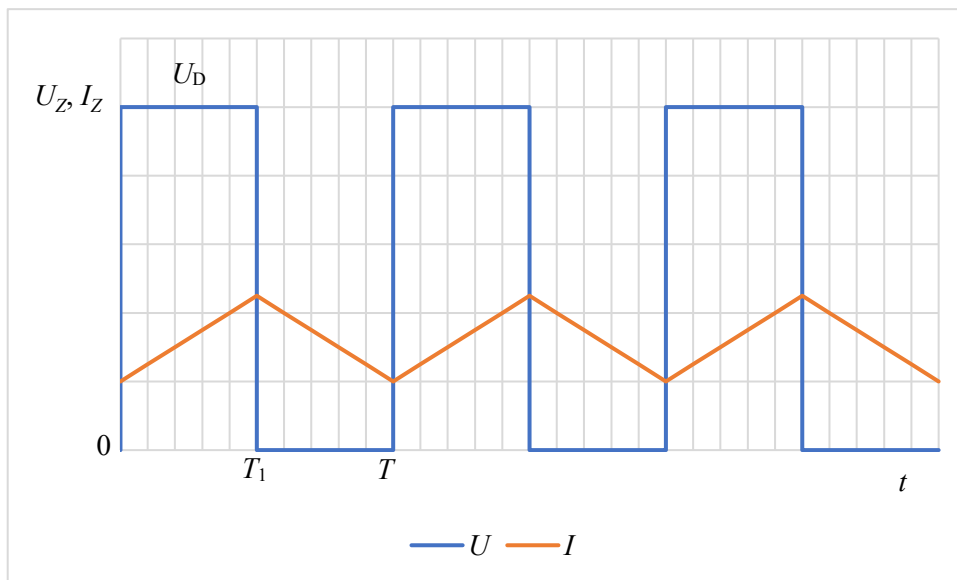
V režimu pro snižování napětí je usměrněné a vyfiltrované napětí meziobvodu střídavě spínáno výkonovým tranzistorem (VT1), což na zátěži vytvoří napěťové pulzy o velikosti napětí meziobvodu, a šířce dané poměrnou dobou sepnutí tranzistoru vůči době periody spínání, tedy zatěžovatelem. Pro jiné než čistě odporové zátěže (v praxi pro všechny typy zátěží) je nezbytné do obvodu zařadit nulovou diodu V02, skrze kterou se uzavírá proud, který nemůže skokově zaniknout. V případě, že by se zde tato dioda nenacházela, došlo by po vypnutí k prudkému nárůstu napětí na indukčnosti, a následně i možnému zničení tranzistoru.

Střední hodnota napětí na zátěži při spojitém proudu je pak [1]

$$U_{Z,AV} = \frac{T_1}{T} \cdot U_D = z \cdot U_D \quad (1.1)$$

Střední hodnota proudu zátěže v ustáleném stavu by v takovém případě byla [1]

$$I_{Z,AV} = \frac{U_{Z,AV} - U_i}{R} \quad (1.2)$$



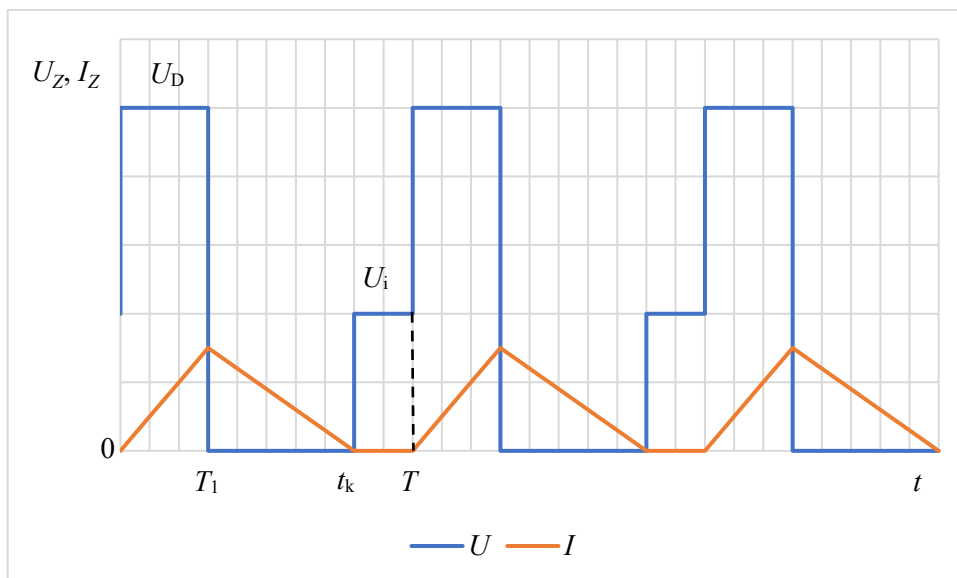
Obr. 1.2: Průběh napětí a proudu snižujícího pulzního měniče pro spojitý proud

V případě nespojitého proudu (způsobeného nízkým napětím meziobvodu, nízkou hodnotou zatěživatele, vysokým odporem zátěže či velkou hodnotou indukovaného napětí), tedy klesá-li proud zátěže na nulovou hodnotu, objevuje se v těchto okamžicích nulového proudu na zátěži indukované napětí, se kterým je při výpočtu střední hodnoty napětí na zátěži nutno také počítat. Výpočet hodnoty napětí na zátěži tedy bude vypadat následovně [1]

$$U_{Z,AV} = \frac{T_1}{T} \cdot U_D + \frac{T - t_k}{T} \cdot U_i \quad (1.3)$$

kdy  $T - t_k$  je doba, po kterou se na zátěži vyskytuje pouze indukované napětí.

Střední hodnotu proudu zátěže je možné vypočítat dosazením (1.3) do (1.2).



Obr. 1.3: Průběh napětí a proudu snižujícího pulzního měniče pro přerušovaný proud

## 1.2 Pulzní měnič pro zvyšování napětí

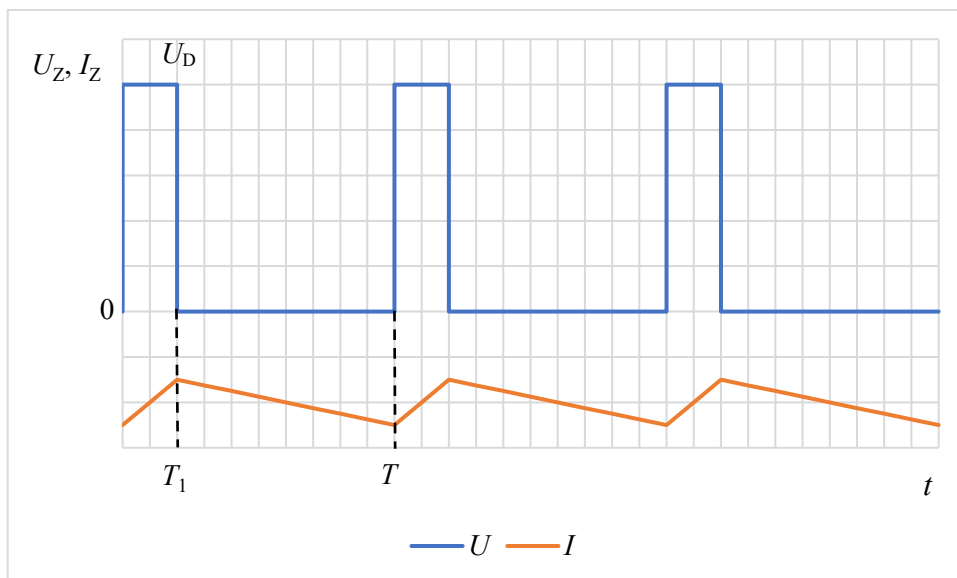
V případě režimu pulzního měniče pro zvyšování napětí je zapotřebí nízké napětí v zátěži dostatečně navýšit, aby bylo možné energii ze zátěže převést zpět do zdroje, případně ji zmařit v brzděném odporu. Toho je dosaženo krátkodobým zkratováním zátěže pomocí sepnutí tranzistoru (VT2), které vyvolá proud zátěže opačného směru oproti režimu pro snižování napětí. Při vypnutí tranzistoru nemůže vlivem indukčnosti proud skokově zaniknout, způsobí tedy nárůst napětí na indukčnosti, po překročení napětí meziobvodu (a prahového napětí diody V02) se proudová smyčka v tomto případě uzavírá přes brzděný odpor. V případě plně řízeného usměrňovače by bylo možné tuto energii rekuperovat zpět do napájecí sítě.

Výpočet střední hodnoty napětí při spojitým proudu zátěže [1]

$$U_{Z,AV} = \frac{T_2}{T} \cdot U_D = \frac{T - T_1}{T} \cdot U_D = (1 - z) \cdot U_D \quad (1.4)$$

Pomocí (1.4) je pak možné vypočítat střední hodnotu proudu následovně [1]

$$I_{Z,AV} = \frac{U_i - U_{Z,AV}}{R} \quad (1.5)$$

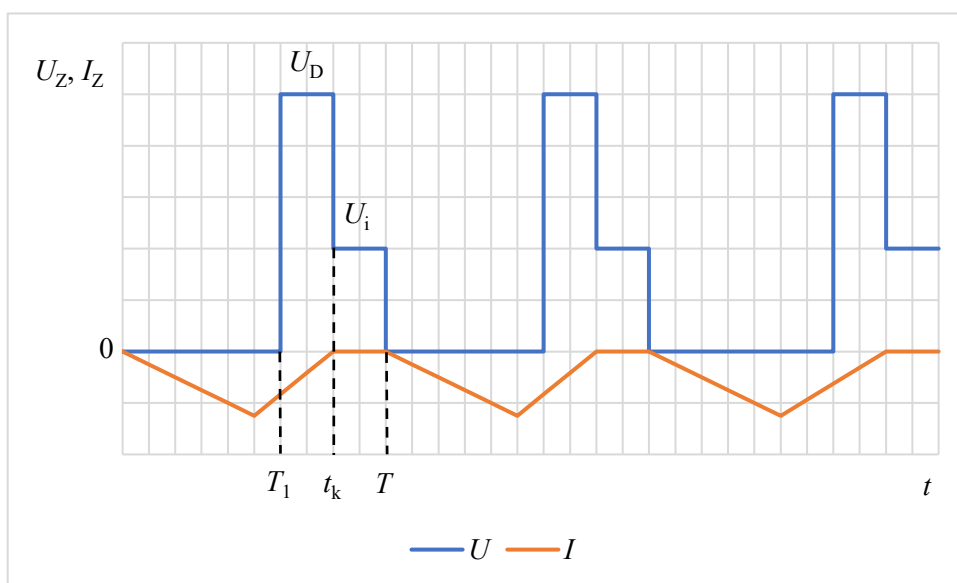


Obr. 1.4: Průběh napětí a proudu zvyšujícího pulzního měniče pro spojitý proud

V případě nespojitého proudu je zapotřebí vztah upravit do následující podoby [1]

$$U_{Z,AV} = \frac{t_k - T_1}{T} \cdot U_D + \frac{T - t_k}{T} \cdot U_i \quad (1.6)$$

Střední hodnotu nespojitého proudu lze spočítat dosazením (1.6) do (1.5).

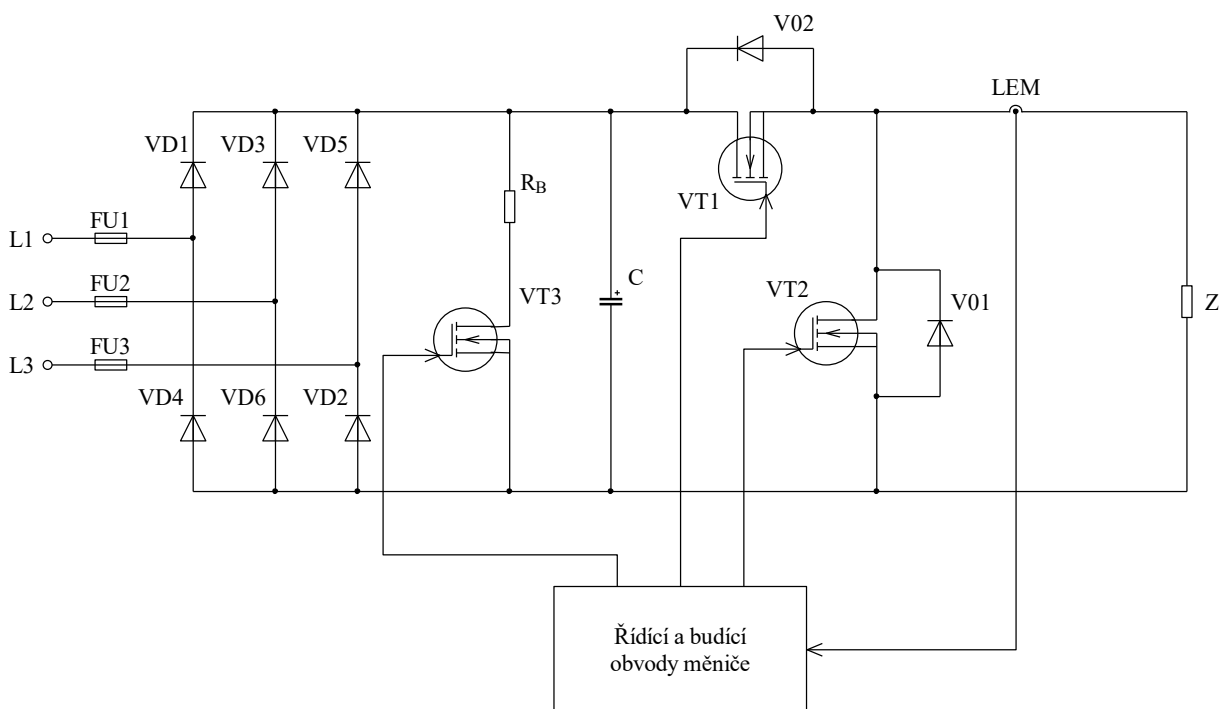


Obr. 1.5: Průběh napětí a proudu zvyšujícího pulzního měniče pro přerušovaný proud

## 2. Stávající výkonová část pulzního měniče

Stávající výkonová část pulzního měniče je tvořena vstupním usměrňovačem, napětovým meziobvodem, tranzistorem pro spínání brzdného odporu, tranzistory pro oba režimy měniče doplněné o nulové antiparalelně zapojené diody a LEM čidlem pro měření proudu zátěže. [2]

Pro možnost připojování různých typů zátěže jsou z výstupu pulzního měniče vyvedeny svorky. Stejně tak jsou vyvedeny i svorky pro připojení externího brzdného odporu.



Obr. 2.1: Schéma zapojení výkonové části pulzního měniče [2]

### 2.1 Vstupní usměrňovač a meziobvod [2]

Vstupní usměrňovač je realizován prostřednictvím trojfázového můstkového, zapojení usměrňovacích diod. Usměrňovač je neřízený, výstupní napětí má tak nejmenší možnou a zároveň stálou hodnotu zvlnění, což zjednodušuje požadavky na filtraci tohoto napětí, ovšem při provozování měniče v režimu pro zvyšování napětí je tedy nutné použít externí brzdový odpor, jinak by mohlo dojít ke zničení kondenzátorové baterie v meziobvodu. Usměrňovač je dimenzován pro napájení z oddělovacího snižujícího trojfázového transformátoru o výstupním fázovém napětí  $U_f = 32 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ . Střední hodnota usměrněného napětí potom bude [2]:

$$U_{D,AV} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_f \cdot \frac{q}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 32 \cdot \frac{6}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = 74,85 \text{ V} \quad (2.1)$$

Závěrné špičkové opakovatelné napětí diod usměřovače [2]:

$$U_{RRM} \geq \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_f \geq \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 32 \geq 78,38 \text{ V} \quad (2.2)$$

Na základě přepokládané nejvyšší střední hodnoty proudu zátěže  $I_{Z,MAX} = 5 \text{ A}$  bude proud diodou usměřovače při maximálním zatížení [2]:

$$I_{F,AV} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{2 \cdot \pi}{3}} I_{Z,MAX} \cdot d\omega t = \frac{1}{T} \cdot I_{Z,MAX} \cdot [\omega t]_0^{\frac{2 \cdot \pi}{3}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot 5 \cdot \left[ \frac{2 \cdot \pi}{3} \right] = 1,67 \text{ A} \quad (2.3)$$

Usměřovač je tvořen diodami 1N5408 s následujícími parametry:

- $I_{F,AV} = 3 \text{ A}$
- $U_{RRM} = 1000 \text{ V}$
- $U_F = 1,2 \text{ V}$
- $I_{FSM} = 200 \text{ A}$
- $P_{tot} = 6,25 \text{ W}$
- $T_j = -55 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$
- Pouzdro DO201

Vzhledem k provedení pouzdra a nízkému ztrátovému výkonu diod  $P_{tot}$  není pro usměřovač řešeno žádné chlazení [2].

Napěťový meziobvod, určený k filtraci usměrněného napětí, je tvořen kondenzátorovou baterií o velikosti  $5 \text{ mF}/100 \text{ V}$ , která vznikla sérioparalelním zapojením jednotlivých elektrolytických kondenzátorů o velikostech  $5 \text{ mF}/50 \text{ V}$ . Maximální zvlnění usměrněného napětí meziobvodu při plném zatížení je  $200 \text{ mV}$  [2].

Meziobvod je také doplněn obvodem pro pozvolné nabíjení, v případě, že by tento obvod použit nebyl, by pro připojení k síťovému napětí (resp. oddělovacímu transformátoru) docházelo k velkým proudovým špičkám při nabíjení kondenzátorové baterie.

## 2.2 Spínací prvky pulzního měniče

Výkonové spínací prvky pulzního měniče jsou namáhány plným napětím meziobvodu. Je však nutné při jejich dimenzování počítat s přepětím vznikajícím při vypínání těchto spínačů, a rovněž s koeficientem bezpečnosti s ohledem na napájecí síť.

Předpokládaná hodnota napětí meziobvodu je rovna  $U_{D,AV} = 74,85 \text{ V}$ , vypínací přepětí může dosahovat 10 % - 20 % tohoto napětí. Koeficient bezpečnosti, zahrnující náhodná i dlouhodobá přepětí v napájecí síti se pohybuje v rozmezí 1,3 – 1,5 [2].

Výsledné napětí, na které jsou dimenzovány spínací prvky (tranzistory a nulové diody) [2]:

$$U_{DS,MAX} = U_R = (U_{D,AV} + 0,2 \cdot U_{D,AV}) \cdot 1,5 = (74,85 + 0,2 \cdot 74,85) \cdot 1,5 = 134,73 \text{ V} \quad (2.4)$$

Proudově jsou spínací prvky dimenzovány podle nejvyšší předpokládané střední hodnoty proudu, protože vzhledem k různým typům zátěže a širokému spektru spínacích frekvencí není možné jednoznačně určit výsledné zvlnění tohoto proudu. Předpokládaná maximální střední hodnota proudu tedy bude [2]:

$$I_{D,MAX} = I_{Z,MAX} = 5 \text{ A}$$

Výkonové spínače jsou tvořeny MOSFET tranzistory IRF840, které splňují výše uvedené požadavky. Tranzistory mají následující základní vlastnosti:

- $U_{DS,MAX} = 500 \text{ V}$
- $I_{DS,MAX} = 8 \text{ A}$
- $R_{DS,ON} = 0,85 \Omega$
- $U_{GS} = \pm 20 \text{ V}$
- $P_{tot} = 125 \text{ W}$
- $T_j = -55 \dots +150 \text{ }^\circ\text{C}$
- Pouzdro TO220AB

MOSFET tranzistory mají v důsledku technologie výroby ve své struktuře implementovanou závěrně polarizovanou parazitní diodu, která při použití tranzistoru pro pulzní měnič funguje jako nulová dioda. Tato dioda však má při vyšších provozních napětích horší dynamické vlastnosti, které se s rostoucí teplotou tranzistoru ještě více zhoršují. Z toho důvodu je nutné tuto parazitní součástku přemostit rychlými spínacími diodami, v tomto případě diodami typu BY329 – 1000 s následujícími parametry:

- $I_{F,AV} = 8 \text{ A}$
- $U_R = 1000 \text{ V}$
- $t_{rr} = 135 \text{ ns}$
- $T_j = 150 \text{ }^\circ\text{C}$
- $I^2 \cdot t = 28 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$
- Pouzdro TO220AC

Spínací tranzistory i nulové diody jsou dostatečně proudově předimenzovány, a to z důvodu výše zmíněného neznámého zvlnění proudu při různých režimech spínání a typech zátěže [2].

Chlazení výkonových spínacích prvků je realizováno prostřednictvím chladiče L 140, typ 34, který slouží pro chlazení jak výkonových tranzistorů, tak i nulových diod [2]. Vzhledem k pouzdrům těchto polovodičových součástek (TO220) je nutné při připojení více součástek k jednomu chladiči použít izolační slídovou podložku a teplovodivou pastu, protože kontaktní strana součástek ve zmíněném pouzdře není elektricky izolována od potenciálových hladin, které součástka propojuje, přímým napojením všech součástek na chladič by tedy mohlo dojít k propojení různých napěťových potenciálů a tedy ke zkratovým proudům s nebezpečím zničení některé části měniče, nebo dokonce ke zranění měřících osob.

### 2.3 Brzdný odpor

Při používání pulzního měniče v režimu pro zvyšování napětí je nutné k určeným svorkám připojit brzdný odpor, který mění energii dodávanou zátěží (motorem) v teplo. Bez připojeného brzdného odporu by došlo k nárůstu napětí v meziobvodu a teoreticky i k jeho zničení.

Protože není předem známa velikost zátěží generovaného napětí, bude vypočtená hodnota brzdného odporu pouze orientační. Při uvažování maximálního proudu 5 A a napětí 100 V tedy bude minimální hodnota brzdného odporu [2]:

$$R_b = \frac{U_z}{I_z} = \frac{100}{5} = 20 \, \Omega \quad (2.5)$$

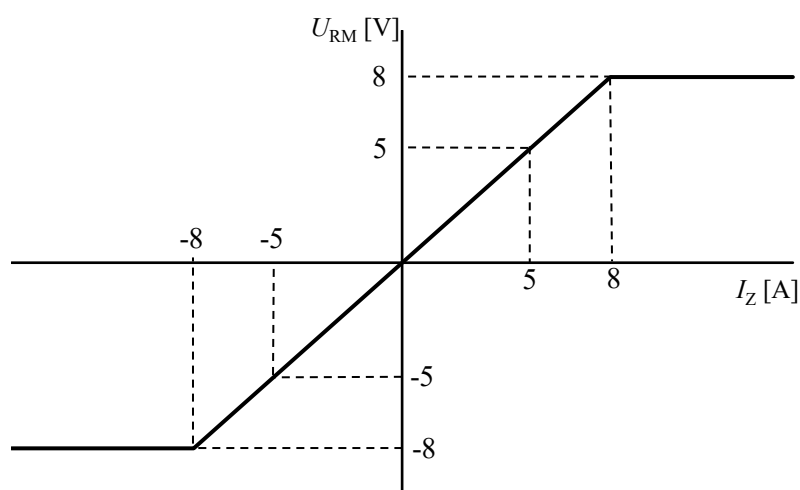


## 2.4 Měření proudu zátěže

Pro možnost provozu pulzního měniče s dvouhodnotovým řízením je zapotřebí proudový snímač. V tomto případě je tento snímač realizován prostřednictvím LEM čidla typu LAH 25 – NP s následujícími parametry:

- |   |              |
|---|--------------|
| - Jmenovitá efektivní hodnota primárního proudu   | 25 A         |
| - Primární proud, měřicí rozsah   | 0 ... 55 A   |
| - Jmenovitá efektivní hodnota výstupního proudu<br>(pro rozsah $\pm 8$ A je tato hodnota 24 mA) | 25 mA        |
| - Přesnost čidla  | $\pm 0,3 \%$ |
| - Převodové poměry  | 1-2-3:1000   |

Vzhledem k maximálnímu proudu měniče  $I_{Z,MAX} = 5$  A je čidlo zapojeno a nastaveno na rozsah měřených proudů  $I_{PN} = \pm 8$  A, a měřicím odporem  $R_M = 330 \Omega$  je zajištěna převodní charakteristika 1:1, tj. 1 A změřeného proudu odpovídá 1 V převedeného napětového signálu [2].



Obr. 2.2: Převodní charakteristika LEM čidla proudu [2]

Tento signál je následně usměrněn pomocí dvoucestného operačního usměrňovače, který zajišťuje kladný signál při obou polaritách proudu. Ze samotného analogového signálu, přiváděného do mikropočítačem řízeného A/D převodníku, tedy není možné určit aktuální směr toku proudu, je však tímto způsobem zdvojnásobena přesnost, se kterou může A/D převodník pracovat.

## 2.5 Jištění měniče

Výkonová část měniče je proti nadproudu jištěna na vstupu (na každé fázi) rychlými pojistkami typu P50K06gR s následujícími parametry:

- $U_N = 690 \text{ V (AC)}, 440 \text{ V (DC)}$
- $I_N = 16 \text{ A}$
- vypínací schopnost
  - AC – 120 kA
  - DC – 50 kA
- $I^2 \cdot t = 73 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$
- typová velikost K/0000

Výkonové tranzistoru nemohou být jištěny pojistkami kvůli vysoké hodnotě tepelného integrálu  $I^2 \cdot t$ . Ochrannou funkci pro tyto tranzistory plní jejich budiče, které měří proud protékající tranzistory a v případě vyhodnocení nadproudu je odpojí [2].

### **3. Požadavky na řídicí část**

Základní požadavky na řídicí část jsou následující:

- Řízení pulzního měniče s konstantní spínací frekvencí
- Dvouhodnotové řízení pulzního měniče
- Zajištění obou způsobů řízení pro snižující i zvyšující režim pulzního měniče
- Komunikace s uživatelským rozhraním
- Kompatibilita se stávajícím systémem

Vedlejším požadavkem na řídicí jednotku je zjednodušení původních dvou součástí – řídicí části a uživatelského rozhraní, na jednu, která bude kombinovat jak mikroprocesorovou řídicí jednotku, tak i ovládací rozhraní – displej s tlačítky.

#### **Řízení s konstantní spínací frekvencí**

Pro splnění tohoto požadavku musí řídicí jednotka umět zajistit generování pulzů pro budiče výkonových tranzistorů podle příslušného nastavení, tj. pro požadovanou, uživatelem nastavenou, frekvenci i střidu, a to s dostatečnou přesností.

Pulzní měnič musí umět pracovat v širokém spektru spínacích frekvencí, konkrétně v rozmezí od 100 Hz do 10 kHz a se střidou od 0 % do 95 %, a nezávisle pro oba režimy (snižující i zvyšující).

#### **Dvouhodnotové řízení**

Při dvouhodnotovém řízení musí řídicí jednotka umět zpracovávat analogový signál generovaný obvodem pro měření proudu, digitalizovat a vyhodnotit jej, a na základě jeho velikosti ovládat spínání příslušného výkonového tranzistoru. Rozpětí, ve kterém je potřeba zajistit tento typ řízení je od 0,5 A do 4,5 A referenční hodnoty proudu zátěže s hysterezí od 100 mA do 1 A.

Požadavkem je také, aby zvlnění proudu nepřesáhlo nastavenou střední hodnotu proudu, tj. při nastavené referenční hodnotě proudu 0,5 A je maximální proudová hystereze 400 mA, při referenční hodnotě proudu 1 A je maximální hodnota hystereze 900 mA.

#### **Komunikace s uživatelským rozhraním**

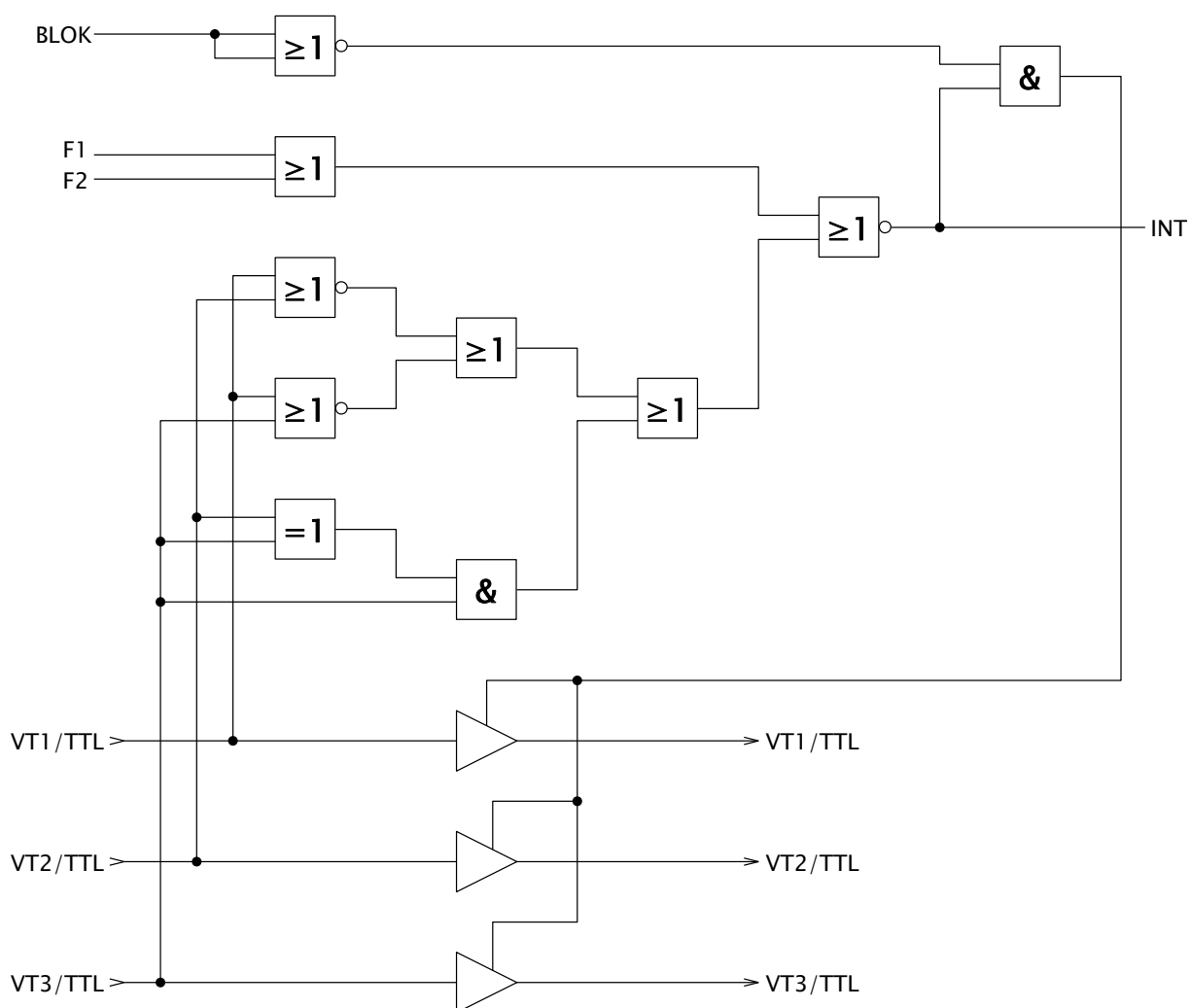
Za uživatelské rozhraní jsou považovány alfanumerický LCD displej a ovládací tlačítka, pomocí kterých uživatel zadává řídicí jednotce požadované hodnoty pro měnič.

## Hardwarová kompatibilita

Řídicí jednotka musí být navržena a zrealizována tak, aby po jejím připojení ke stávajícímu pulznímu měniči byla zajištěna správná funkce měniče. Musí tedy být respektovány vlastnosti budičů a blokovací logiky, popsané v Kap. 3.1.

### 3.1 Blokovací a budičí obvody měniče

#### Blokovací logika



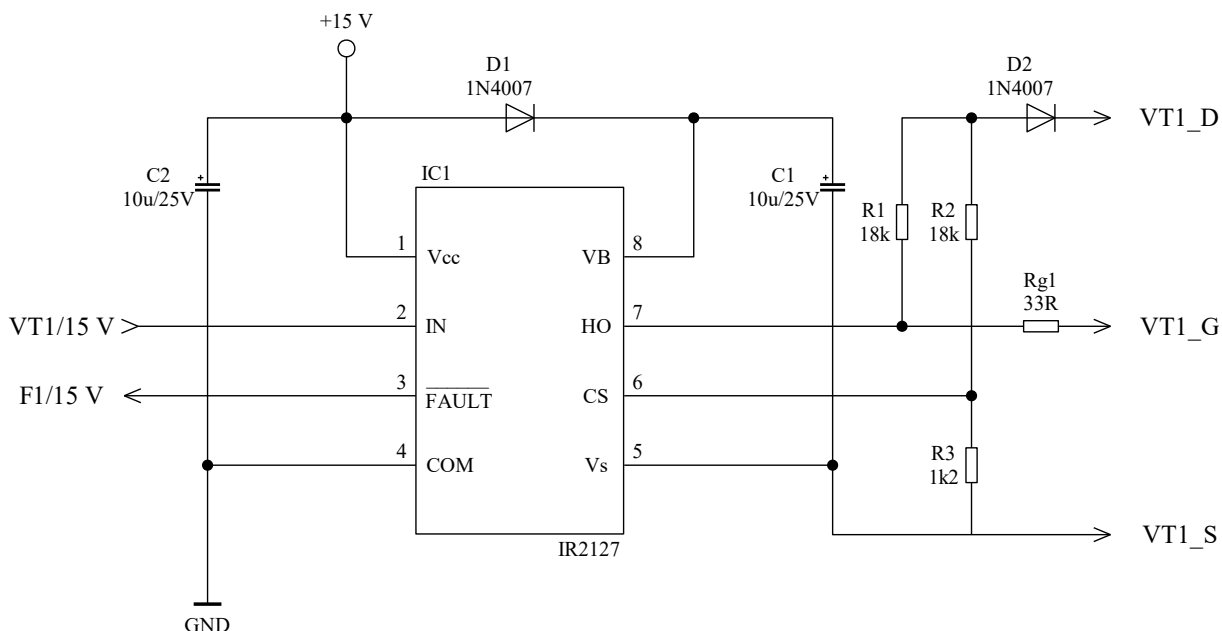
Obr. 3.1: Blokové schéma blokovací logiky měniče [2]

Blokovací logika má za úkol zajistit odpojení posilovačů sběrnice, tj. zamezení přivedení spínacích pulzů na budiče (v případě spínače brzdného odporu pak přímo na tranzistor), v případě nedovoleného stavu, a tím zamezit možnému poškození měniče. Za takový stav logika považuje nedovolenou spínací kombinaci tranzistorů, indikaci nadproudu od budičů (signály F1 a F2) a stisk ovládacího tlačítka BLOK. V případě některého ze zmíněných stavů jsou odpojeny posilovače sběrnice spínacích pulzů, a zároveň je vyslán signál pro vygenerování vnějšího přerušení mikropočítače, které zastaví program, viz Kap. 4.1. Signál INT, tedy hlášení nedovoleného stavu a blokování měniče, je aktivní v log. 0.

Po zániku nedovoleného stavu jsou sběrnice opět připojeny a měnič může dále pracovat.

### Buzení výkonových tranzistorů

Výkonové tranzistory VT1 a VT2 jsou buzeny pomocí budičů IR 2127, které zároveň slouží jako jejich ochrana před nadproudem [2].



Obr. 3.2: Schéma zapojení budiče výkonového tranzistoru [2]

Optočlen, zařazený mezi obvody blokování a buzení, invertuje mikropočítačem generovaný signál, a zároveň převádí napěťovou úroveň toho signálu z TTL na 15 V.

Tyto signály budiče zpracovávají a podle nich zajišťují požadované spínání tranzistorů. Společně s tím budiče i měří proud protékající tranzistorem pomocí vstupu CS, a v případě indikace nadproudu je tranzistor odpojen a na výstup FAULT je vyslán signál v log. 0, opět pomocí optočlenu převedený na úroveň TTL, informující blokovací logiku, a tím i mikropočítač, o nedovoleném stavu, což vede k zastavení programu a zablokování posilovačů sběrnic spínacích signálu na dobu, dokud nadproud neklesne pod maximální dovolenou hodnotu.

## 4. Návrh řídicí jednotky měniče

Řídicí jednotka je, vzhledem k požadavkům (viz Kap. 3), realizována prostřednictvím mikropočítače, jehož periferie (A/D převodník, Čítače/Časovače, PWM moduly) jsou využity pro řízení pulzního měniče, a zároveň s tímto je schopen komunikovat s uživatelským rozhraním. Pro řídicí jednotku byl zvolen 8-bitový jednočipový mikropočítač PIC16F877A firmy Microchip Technology, který všechny požadavky na řídicí část splňuje.

### 4.1 Mikropočítačový řídicí systém

Zvolený mikropočítač PIC16F877A je charakterizován následujícími vlastnostmi a periferiemi [3]:

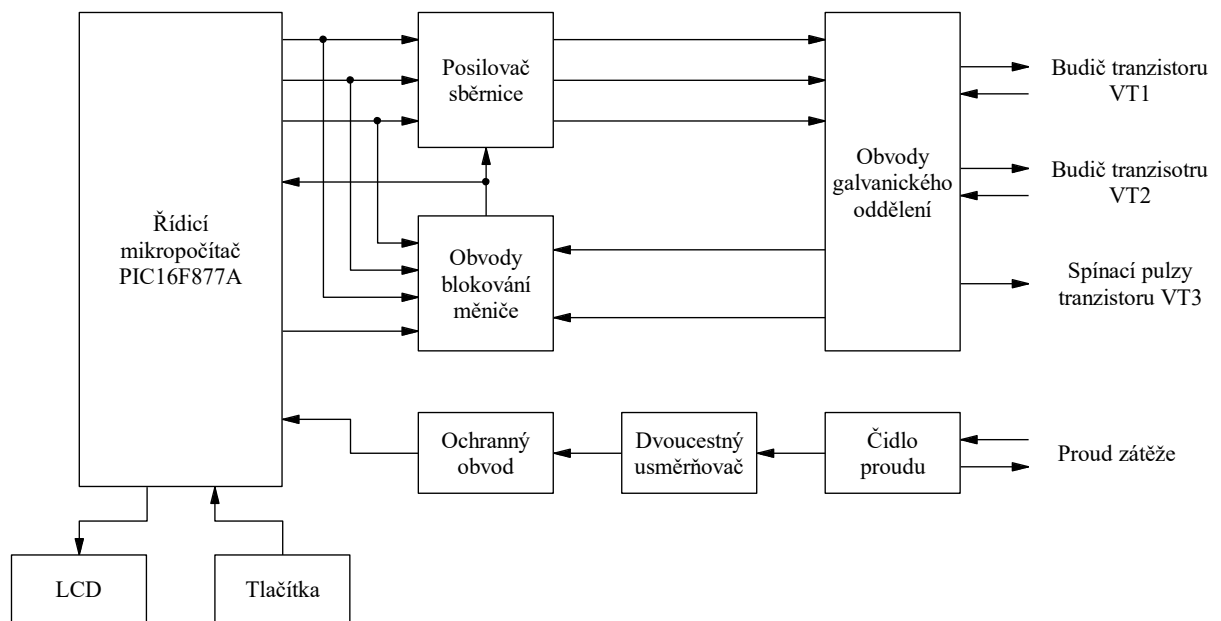
- 8-bitová CPU
- doba strojového cyklu 0,2  $\mu$ s při použití 20 MHz oscilátoru
- struktura typu RISC – obsahující 35 instrukcí
- 3 Čítače/Časovače (2x 8-bitový, 1x 16-bitový s nastavitelnými děličkami frekvence)
- 8-kanálový 10-bitový A/D převodník
- 2 Capture/Compare/PWM moduly
- 368 Bytů datové paměti RAM
- 256 Bytů paměti EEPROM
- 14,3 kB paměti Flash (8192 jednoslovných instrukcí)

Další parametry lze najít v literatuře [3]. Blokové schéma struktury mikropočítače je na *Obr. 4.3*.

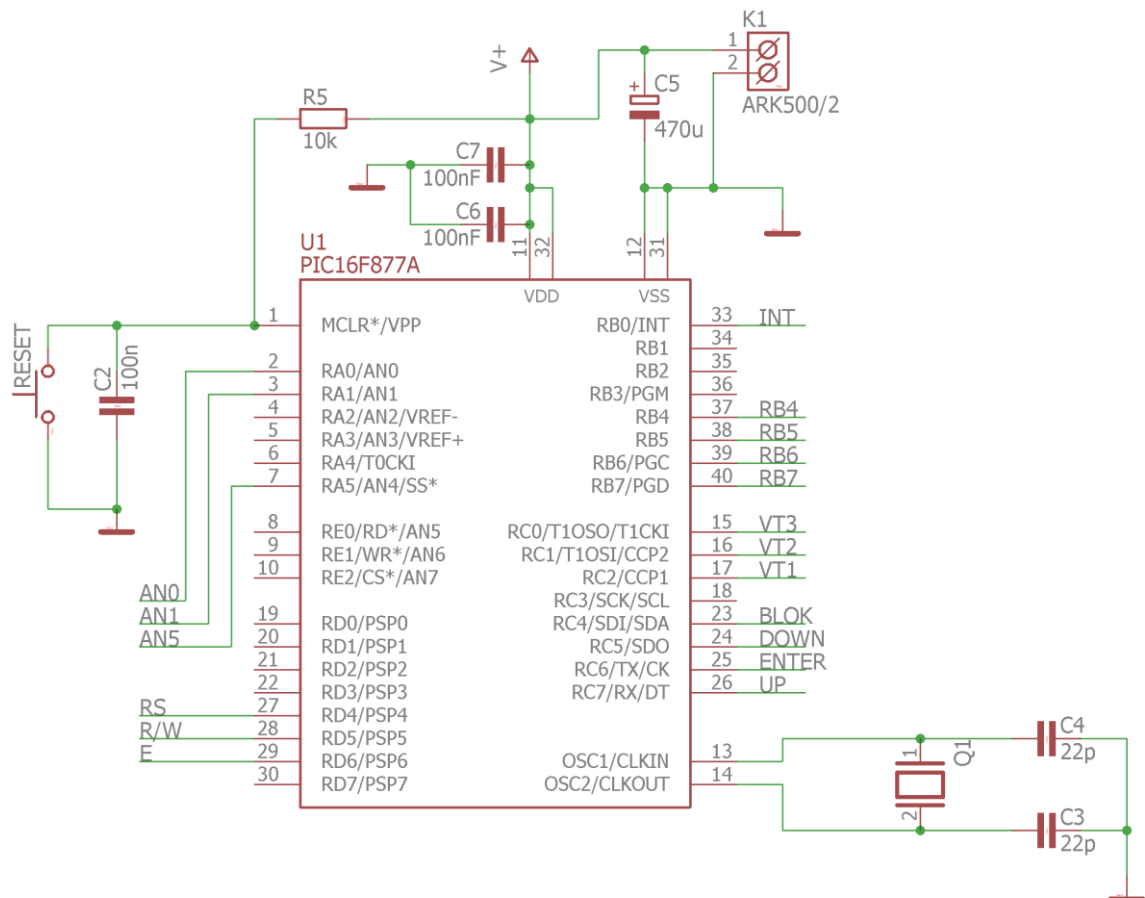
Vzhledem k tomu, že zvolený mikropočítač svými parametry (primárně velikostí RAM a Flash paměti) plně vyhovuje požadavkům na řídicí program, nebude třeba žádný přídavný externí obvod. Tím pádem je splněn vedlejší požadavek na řídicí jednotku – řídicí část (mikropočítač) i uživatelské rozhraní (displej, tlačítka) mohou být umístěny na jednu desku plošného spoje s jednotným napájením 5 V.

*Obr. 4.1* zobrazuje blokové schéma připojení řídicí jednotky k budičím a blokovacím obvodům. Zpětný signál od budičů tranzistorů VT1 a VT2 je indikátor nadproudu měřeného budičem, u tranzistoru VT3 není nadproud hlídán.

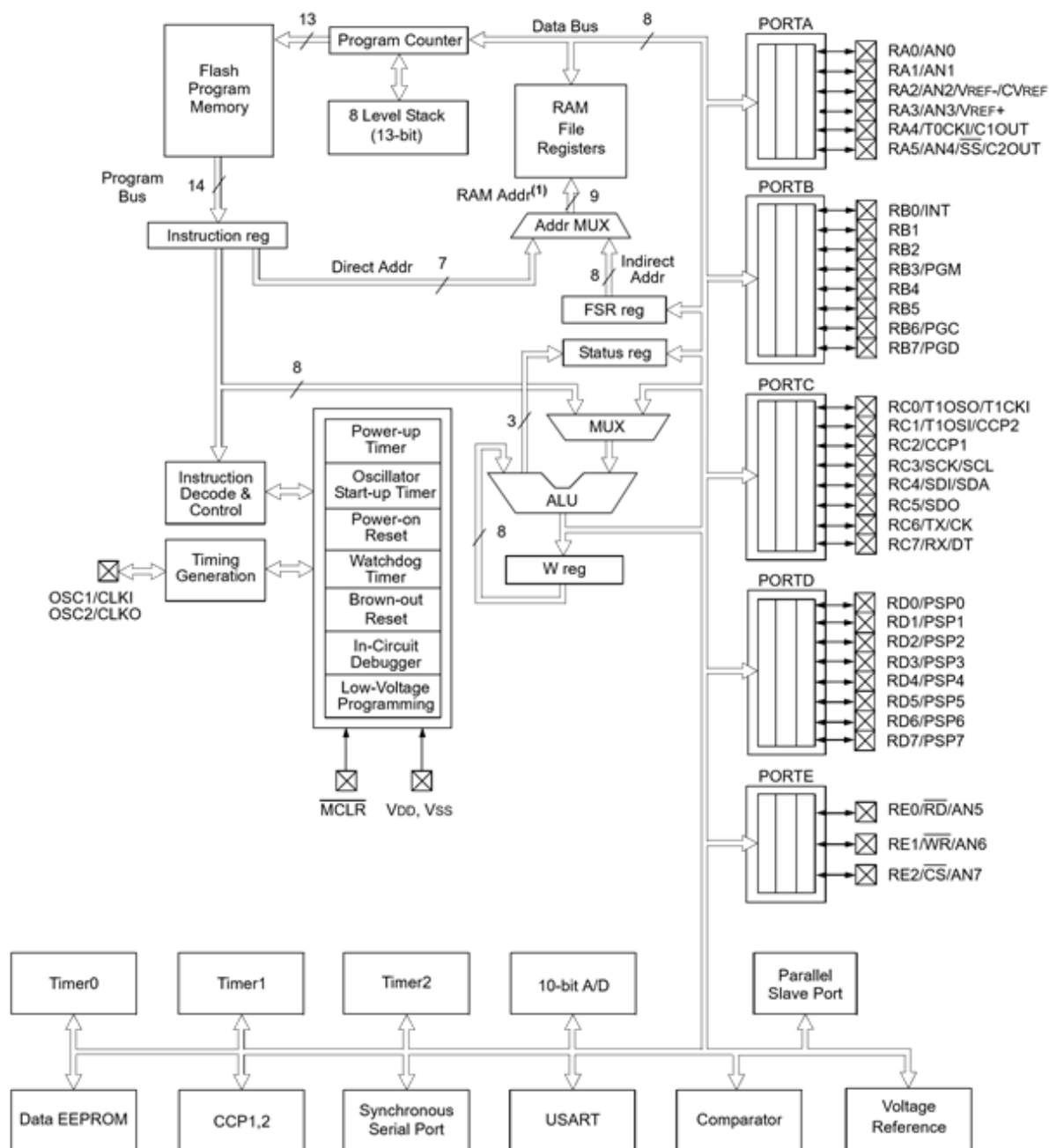
V případě nedovoleného stavu vysílá blokovácí logika (obvody pro blokování) signál o tomto stavu na pin RB0, čímž je vyvoláno vnější přerušování a zastavení programu. V případě zastavení programu mikropočítačem, tj. bez zásahu blokové logiky, je na blokovací obvody vyslán signál, který vyvolá odpojení posilovače sběrnice. Tento signál je generován na pinu RA1. Všechny signály pro budiče i blokovací logiku, případně od blokové logiky, jsou vysílány vůči signálové zemi, která je umístěna na pinu RA5 řídicího mikropočítače.



Obr. 4.1: Blokové schéma řídicích obvodů [2]



Obr. 4.2: Schéma zapojení řídicího mikropočítače



Obr. 4.3: Blokové schéma řídicího mikropočítače [3]



## 4.2 Uživatelské rozhraní měniče

Uživatelské rozhraní, určené k nastavování parametrů pulzního měniče, případně k jejich změně, je tvořeno displejem, čtyřmi ovládacími tlačítky a tlačítkem pro reset řídicí jednotky.

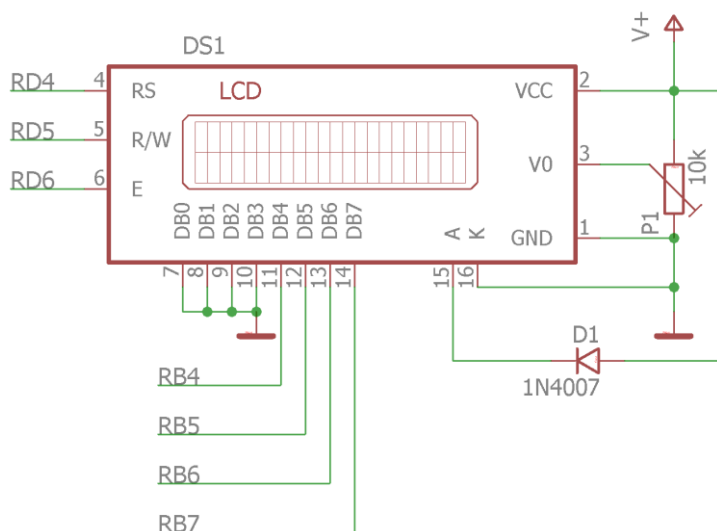
Alfanumerický displej, technologie LCD, je dvouřádkový, zobrazuje na každém řádku 16 znaků tvořených maticí 5x8 bodů. Displej obsahuje řadič typu ST7066 (náhrada HD44780). Komunikace s mikropočítačem probíhá pomocí portu B (piny RB4 – RB7) sloužícího pro přenos dat a portu D pro řízení displeje. Pin RD4 je přiřazen signálu RS (Register Select), pin RD5 signálu R/W (Read/Write) a pin RD6 signálu E (Enable).

Protože není nutné pro správnou funkci měniče z displeje číst, je možné signál R/W připojit na zem, v tomto případě je však připojen na příslušný pin mikropočítače. Signál RS rozhoduje, zda jsou na datové sběrnici (RB4 – RB7) instrukce (RS = 0) nebo data (RS = 1). Sestupná hrana signálu E značí, že jsou na datové sběrnici platná data.

Řadič disponuje ovládacími funkcemi displeje – vymazat displej, přesunout kurzor na základní pozici, zapnout/vypnout displej, zapnout/vypnout kurzor, blikání kurzoru, posun kurzoru a posun displeje. Displejem zobrazované znaky patří do tabulky ASCII, lze zobrazovat čísla, operátory, písmena latinky a azbuky (druhý typ písma se může lišit podle použitého typu displeje), případně uživatelem definované znaky.

Celý program ovládání zápisu na displej je zjednodušen použitím předdefinovaného kódu určeného pro konkrétní typ displeje (řadiče) a řídicího mikropočítače. Po zahrnutí tohoto kódu do hlavního programu pak stačí pouze pomocí funkce zapsat jaké znaky se mají zobrazit, a kód sám tyto znaky převede na instrukce a data pro řadič a následně je zobrazí na displeji.

LED podsvícení displeje má jmenovitou hodnotu napájení 4,2 V, dioda D1 tedy snižuje hodnotu napájecího napětí 5 V na požadovanou nižší hodnotu.

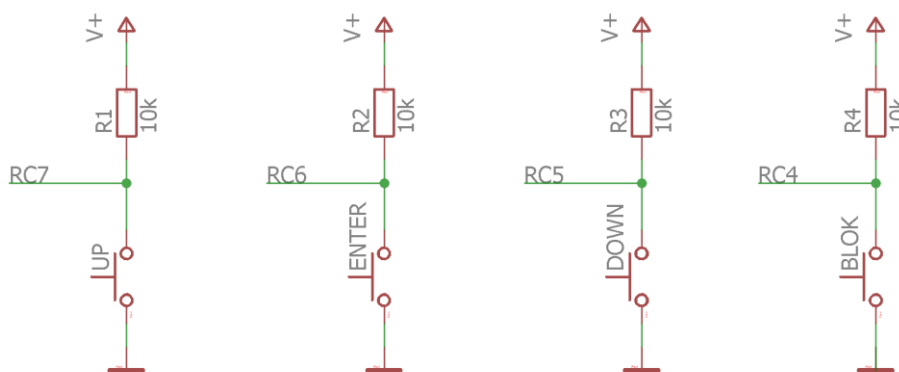


Obr. 4.4: Schéma zapojení LCD

Tlačítka sloužící k nastavování parametrů měniče, pohybu v menu, spouštění a blokování měniče jsou rozdělena takto:

UP	- pohyb v menu nahoru, zvýšení hodnoty nastavovaného parametru
DOWN	- pohyb v menu dolů, snížení hodnoty nastavovaného parametru
ENTER	- potvrzení položky v menu, nastaveného parametru, spuštění měniče
BLOK	- zablokování měniče, návrat do počátečního menu

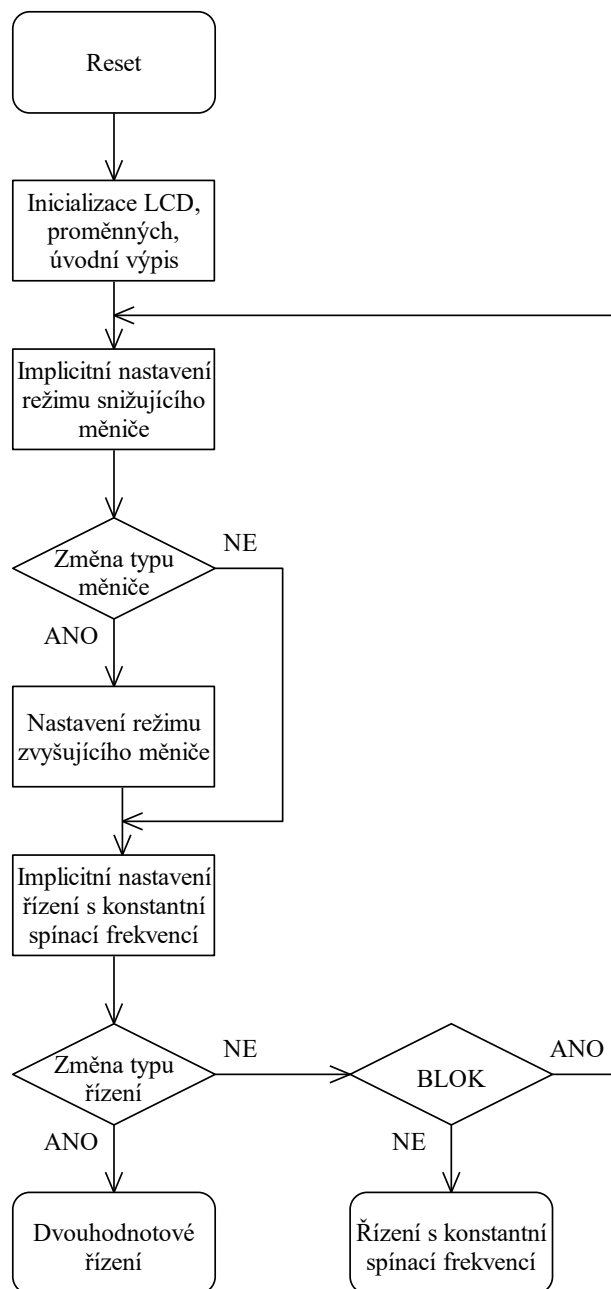
Tlačítka jsou realizována za pomoci pull-up rezistoru, při stisku tlačítka je tedy na příslušném pinu logická 0, viz *Obr. 4.5*. Proti kmitání, vznikajícím při spínání, jsou tlačítka ošetřena softwarově, po stisku zaznamenání stisku tlačítka programem nastává prodleva dlouhá 300 ms, během které program nereaguje na opětovný stisk tlačítka či případný zákmit, který se stisku podobá.



*Obr. 4.5: Schéma zapojení tlačítek*

Zapojení tlačítka RESET, kterým je možné resetovat program, je zobrazeno na *Obr. 4.2*. Protože reset nastává v okamžiku příchodu log. 0 na pin MCLR, musí být i toto tlačítko realizováno pomocí pull-up rezistoru. Pro zajištění trvalé hodnoty log. 1 na tomto pinu je paralelně s tlačítkem zařazen blokovací kondenzátor.

## 5. Programové vybavení řídicí jednotky [4]



Obr. 5.1: Vývojový diagram menu – nastavovací rutiny měniče

Do programového vybavení patří funkce zobrazování na displeji, kontrola stisku tlačítek, reakce na vnější přerušení blokovací logiky a samotná hlavní funkce řídicí jednotky – generování spínacích pulzů pro tranzistory v obou režimech funkce i způsobech řízení.

Celý kód, vyjma počáteční inicializace vstupně/výstupních pinů, displeje a proměnných, je rozdělen na pět hlavních částí. V prvních čtyřech částech se jedná o nastavovací rutinu měniče, vybírá se zde tedy režim měniče, způsob řízení měniče, spínací frekvence (resp. referenční hodnota proudu) a zatěžovatel (resp. proudová hystereze). V poslední, páté, části kódu jsou již na příslušný pin, ovládající spínání tranzistoru, generovány spínací pulzy dle předchozího nastavení, v případě režimu pro zvyšování je navíc trvale sepnut tranzistor pro spínání brzdného odporu.

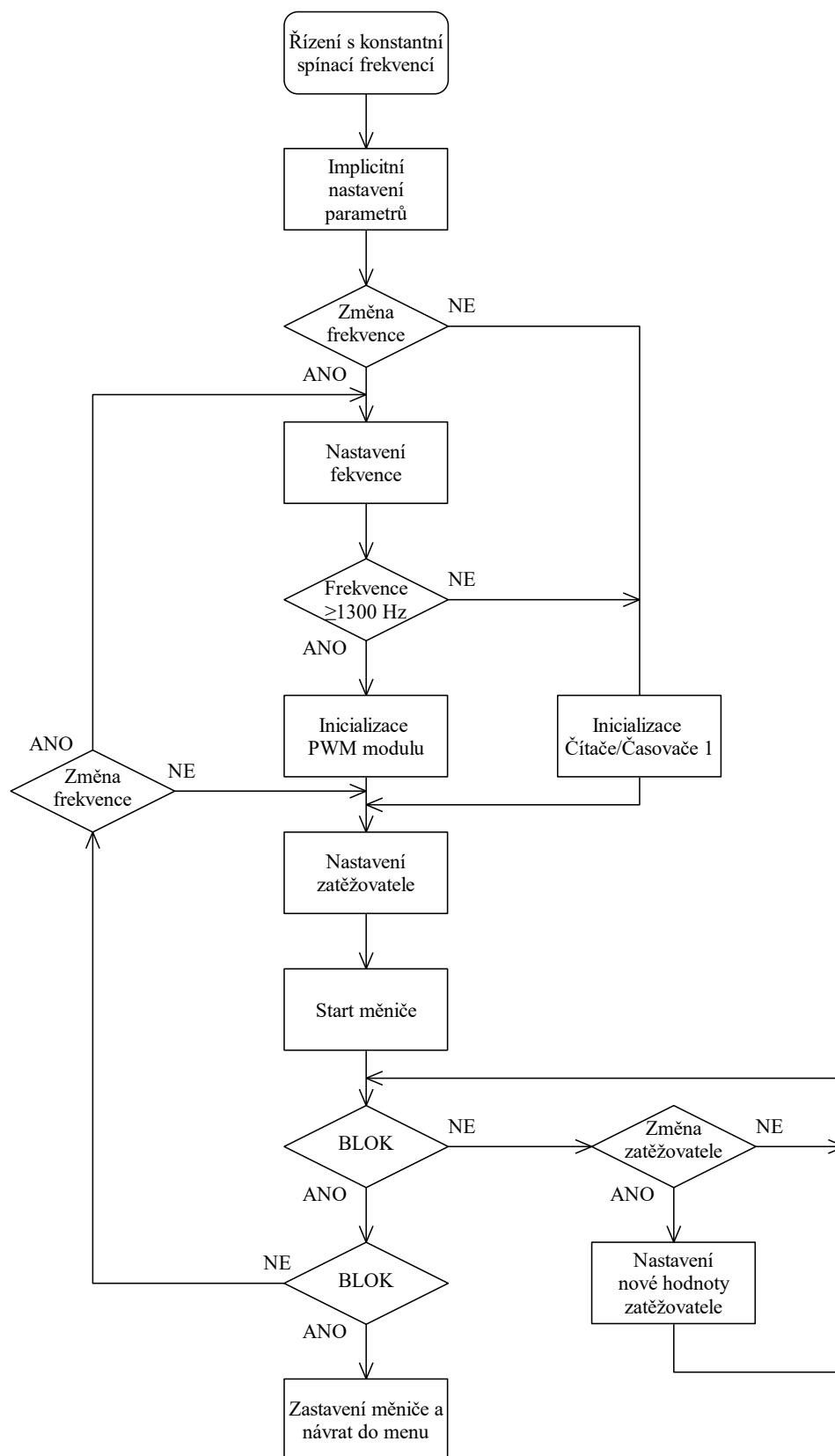
Přerušovací rutiny obsahuje program celkem tři – rutinu vnějšího přerušení od blokovací logiky, přerušení vyvolané přetečením čítače/časovače 1 (viz Kap. 5.1) a přerušení A/D převodníku při dokončení převodu (viz Kap. 5.2). Vnější přerušení, vyvolané blokovací logikou z důvodu nedovoleného stavu spínání, způsobí zastavení programu, uvedení všech řízených pinů do log. 1 a návrat na začátek celého programu. Vnější přerušení je vyvoláno signálem v log. 0, přesněji sestupnou hranou tohoto signálu (viz Kap. 3.1), na pin RB0 mikropočítače, což lze nastavit pomocí registru OPTION\_REG.

Celý kód, tj. hlavičkové a zdrojové soubory jsou přiloženy v elektronické podobě v Příloze č. 4.

## **5.1 Řízení s konstantní spínací frekvencí**

Řízení s konstantní spínací frekvencí lze použít pro širší spektrum frekvencí, a to v rozsahu 100 Hz – 10 kHz, přičemž v rozsahu 100 Hz – 3 kHz je krok změny 100 Hz (je kladen důraz na tyto nižší frekvence), zatímco v rozsahu 3 kHz – 10 kHz je krok 500 Hz.

Hodnota zatěžovatele může být v rozmezí 0 – 95 % s krokem 5 %. Hodnoty 100 % zatěžovatele není možné kvůli charakteru budičů u tranzistorů VT1 a VT2 dosáhnout, maximální dosažená hodnota pro experimentální účely je 99 %, této hodnoty bylo dosaženo v rámci první a druhé části frekvenčního rozsahu, tj. v rozmezí 100 Hz – 5 kHz, pro vyšší frekvence již této hodnoty nebylo možné dosáhnout.



Obr. 5.2: Vývojový diagram řízení s konstantní spínací frekvencí

Pro tuto formu řízení je z hlediska nastavení i výsledné přesnosti nejefektivnějším řešením použit moduly Capture/Compare/PWM (CCP), konkrétně tedy jejich funkci PWM, které po zadání požadovaných hodnot do příslušných registrů vygenerují signál o žádané frekvenci a střídě na výstupním pinu daného modulu (RC2 pro modul CCP1, RC1 pro modul CCP2), bez nutnosti návrhu přerušovací rutiny či jejího obsluhování.

Zvolený mikropočítač však tyto moduly může používat až od hodnoty frekvence generovaného signálu 1,22 kHz, nejnížší frekvence, pro kterou je tedy možné tuto funkci použít, je 1,3 kHz. Nižší spínací frekvence je tudíž nutné ošetřit jiným způsobem – za pomoci čítače/časovače a přerušovací rutiny. Pro dosažení vyšší přesnosti při použití modulu PWM je nutné při požadované frekvenci výstupního signálu více než 4,88 kHz, tj. při frekvenci 5 kHz pozměnit nastavení PWM modulu. Celý frekvenční rozsah je tedy rozdělen na tři části:

- $100 \text{ Hz} \leq f_s < 1,3 \text{ kHz}$
- $1,3 \text{ kHz} \leq f_s < 5 \text{ kHz}$
- $5 \text{ kHz} \leq f_s \leq 10 \text{ kHz}$

Pro první část, tedy frekvence v rozsahu 100 Hz – 1,2 kHz, je použit Čítač/Časovač 1, který kombinuje vysokou přesnost čítání (1:1 strojového cyklu) a také dostatečnou kapacitu čítání i při nejnížší požadované frekvenci. Pro generování řídicího signálu je zapotřebí pomocí nastavit samotný Čítač/Časovač (zdroj referenčního signálu, nastavení čítání 1:1) pomocí registru T1CON a dále povolit přerušování při přetečení čítače registry INTCON a PIE1. Před spuštěním čítání (bit TMR1ON v registru T1CON) je nutné do registrů čítače TMR1L (spodních 8 bitů) a TMR1H (horních 8 bitů) nahrát hodnotu odpovídající plné hodnotě registrů (při 16 bitech to je  $2^{16} - 1$ ) po odečtení hodnoty odpovídající době požadované periody signálu. Vzhledem ke složitosti kódu byly tyto hodnoty, nahrávané do registrů, zjišťovány a doladěny na maximální přesnost experimentálně.

Protože se zatěžovatel mění s krokem 5 %, je nutné zajistit, aby k přerušování, tj. k přetečení čítače, došlo 20–krát za požadovanou periodu výstupního signálu. Při každém přerušování se inkrementuje pomocná proměnná, a zároveň se tato proměnná porovnává s nastavenou hodnotou zatěžovatele. V okamžiku, kdy se tyto hodnoty rovnají, je výstupní pin negován. Inkrementace pomocné proměnné na hodnotu 19 (tedy v pořadí 20. hodnota) znamená dokončení jedné periody řídicího signálu, výstupní pin je opět negován, pomocná proměnná vynulována a celý proces začíná znovu. Jako výstupní piny jsou použity RC2 pro spínač VT1 a RC1 pro spínač VT2, aby bylo dodrženo pevně dané uspořádání modulů PWM.

Pro druhou, resp. třetí, část frekvenčního rozsahu je použit výše zmíněný modul PWM. Modul využívá Čítač/Časovač 2, a přestože nepotřebuje pro správnou funkci žádnou uživatelem definovanou přerušovací rutinu, je nezbytné opět jako v předchozím případě povolit přerušování pomocí registrů INTCON a PIE1 (PIE2), dále nastavit Čítač/Časovač 2 registrem T2CON i samotný PWM modul registrem CCP1CON (CCP2CON).

Hodnotu odpovídající periodě výstupního signálu je třeba zapsat do registru PR2, perioda se počítá podle vzorce ( $N_{\text{TMR2}} = 16$  pro 2. část rozsahu frekvencí,  $N_{\text{TMR2}} = 4$  pro 3. část rozsahu frekvencí) [3]

$$T_{\text{PWM}} = [(PR2 + 1) \cdot 4 \cdot T_{\text{OSC}} \cdot N_{\text{TMR2}}] \quad (5.1)$$

Poměrná doba sepnutí, tedy střída, je reprezentována 10-bitovým slovem, kdy horních 8 bitů tvoří registr CCPR1L (CCPR2L), dolní dva bity se nacházejí v registru CCP1CON (CCP2CON) na pozicích <5:4>. Výpočet tohoto slova vychází z následujícího vzorce (definovaného pro modul CCP1, pro modul CCP2 by tento vzorec vypadal obdobně jen s použitím příslušných registrů) [3]

$$T_{DUTY} = (CCPR1L: CCP1CON < 5: 4 >) \cdot T_{OSC} \cdot N_{TMR2} \quad (5.2)$$

Maximální rozlišení střidy se vzrůstající frekvencí výstupního signálu klesá, v použitém rozsahu 100 Hz – 10 kHz je však toto rozlišení plné, tedy 10 bitů.

V obou případech, tedy při generování signálu pomocí přerušení i pomocí PWM modulu, je hlavní částí programu nekonečná smyčka kontrolující stisk tlačítek (UP, DOWN, BLOK, RESET) a vnější přerušení od blokovací logiky.

Řízení s konstantní spínací frekvencí umožňuje operativní změnu zatěživatele v plném rozsahu, tedy od 0 % do 95 %.

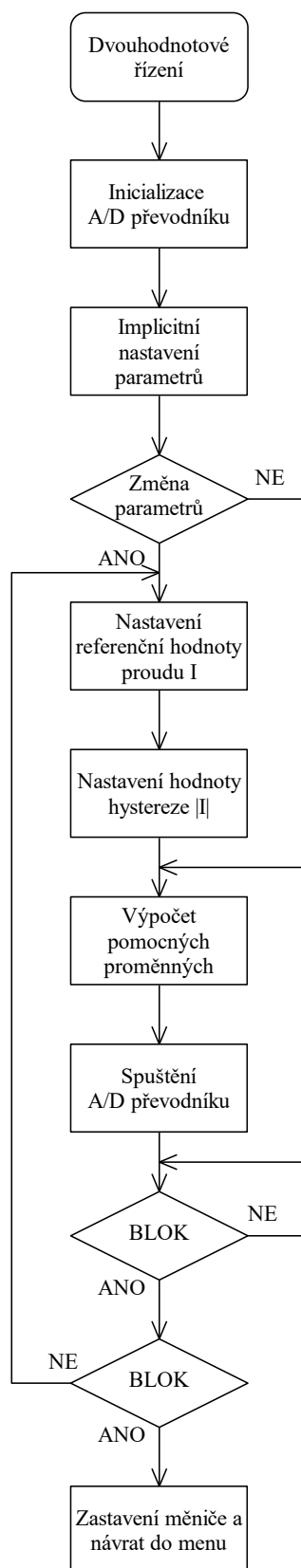
Implicitní nastavení řízení s konstantní spínací frekvencí je na hodnotu spínací frekvence  $f_s = 100$  Hz a zatěživatele  $z = 0$  %. Po zablokování měniče je možné, při stejném zvoleném režimu měniče i řízení, změnit parametry, tedy spínací frekvenci a zatěživatele. Frekvence po zablokování zůstává na původně nastavené hodnotě, zatěživatel taktéž.

## 5.2 Dvuhodnotové řízení

Dvuhodnotové řízení je realizováno pomocí A/D převodníku, který digitalizuje analogovou hodnotu proudu zátěže, měřenou pomocí LEM čidla proudu (viz Kap. 2.4), čítače/časovače a PWM moduly jsou při tomto řízení nevyužity. A/D převodník lze využít pro referenční hodnotu proudu zátěže od 0,5 A do 4,5 A s krokem 0,5 A a proudovou hysterezí od 100 mA do 1 A s krokem 100 mA. Hysterezi je myšleno zvlnění proudu špička-špička, tj. od nastavené referenční hodnoty proudu jsou meze spínání tranzistorů  $\pm 1/2$  hodnoty nastavené hystereze proudu. Referenční hodnotu proudu nelze nazvat hodnotou střední, přestože se nachází přesně uprostřed zvlnění, a to proto, že při výrazně exponenciálním průběhu proudu, tj. při nízké frekvenci spínání a velké časové konstantě zátěže, je větší část proudu níže než tato referenční hodnota, tudíž je střední hodnota proudu menší než referenční. Za předpokladu vyšší frekvence spínání, obvykle u malé hodnoty hystereze, je tvar proudu takřka trojúhelníkový, v takovém případě pak referenční hodnota proudu může být rovna i jeho střední hodnotě.

A/D převodník využívá pro rozlišení napěťových úrovní jako referenci hodnotu napájecího napětí, není tedy zapotřebí realizace zdroje referenčního napětí. Napěťová kvantizační úroveň bude mít hodnotu

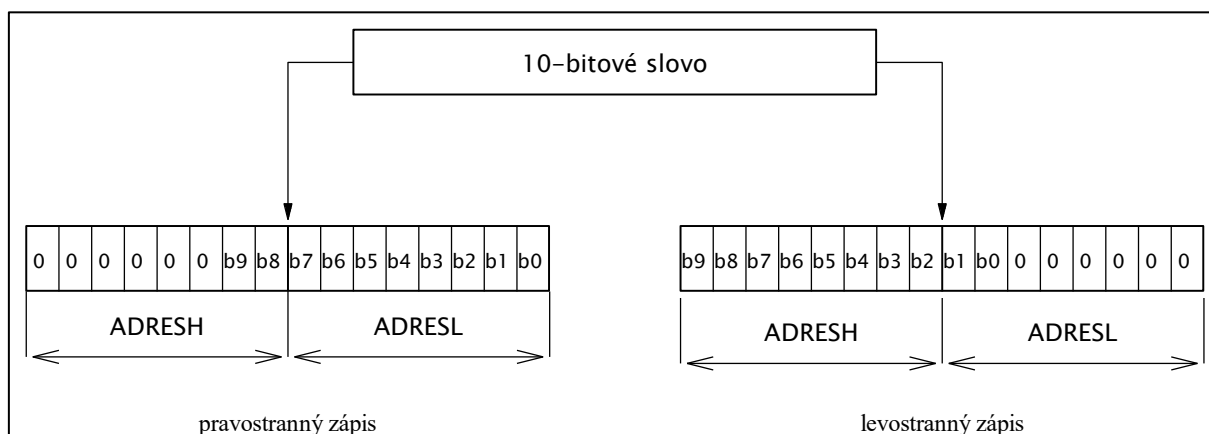
$$U_{KVANT} = \frac{\Delta U}{2^n - 1} = \frac{5}{2^{10} - 1} = \frac{5}{1023} = 4,89 \cdot 10^{-3} = 4,89 \text{ mV} \quad (5.3)$$



Obr. 5.3: Vývojový diagram dvouhodnotového řízení



Před nastavením A/D převodníku a jeho spuštěním je zapotřebí vypočítat horní a dolní meze spínání tranzistoru z nastavených parametrů. Pro jednu mez jsou vždy vypočteny dvě pomocné proměnné, protože výsledek převodu je 10-bitové slovo rozdělené do dvou registrů – ADRESH a ADRESL. V tomto případě je převodník nastaven na pravostranný zápis, tj. spodních 8 bitů výsledného slova se nachází v registru ADRESL a horní 2 bity jsou zapsány do registru ADRESH na nejnižší dvě pozice, zbylé, nevyužité bity jsou zapásány jako log. 0. V souladu s tímto nastavením jsou vypočítávány i pomocné proměnné, po dokončení převodu se tedy porovnávají dvě proměnné s dvěma hodnotami v registrech [3].



Obr. 5.4: Zobrazení možných zápisů výsledku A/D převodu [3]

A/D převodník je nastaven pomocí registrů ADCON0 a ADCON1, jimiž se nastavuje rychlost převodu, použitý kanál převodníku, začátek převodu, zapnutí převodníku, zápis výsledku a rozdělení vstupních pinů na analogové a digitální. Také je nutné pomocí registrů INTCON a PIE1 povolit přerušování od A/D převodníku [3].

Minimální doba převodu jednoho bitu  $T_{AD}$  je dle katalogových údajů  $1,6 \mu s$ . Při použití 20 MHz oscilátoru (s periodou  $T_{OSC} = 50 ns$ ) lze jako  $T_{AD}$  použít  $32 \cdot T_{OSC}$  nebo  $64 \cdot T_{OSC}$ . Pro dosažení nejrychlejšího možného převodu je tedy použito hodnoty

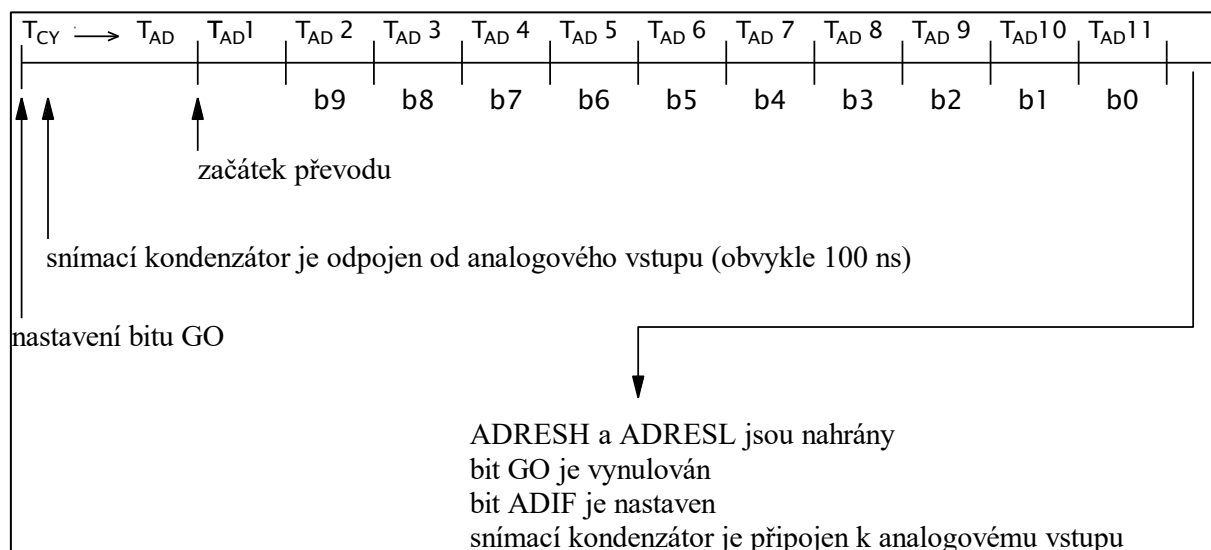
$$T_{AD} = 32 \cdot T_{OSC} = 32 \cdot 50 \cdot 10^{-9} = 1,6 \cdot 10^{-6} = 1,6 \mu s \quad (5.4)$$

Převod analogové hodnoty na digitální trvá minimálně  $12 \cdot T_{AD}$ , což v tomto případě znamená

$$T_{převodu} = 12 \cdot T_{AD} = 12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} = 19,2 \cdot 10^{-6} = 19,2 \mu s \quad (5.5)$$

Jako použitý kanál je zvolen vstup AN0 s ohledem na následující nastavení analogově digitálních vstupů, kdy je tento jediný kanál nastaven jako analogový vstup, všechny ostatní kanály A/D převodníku (porty A a E) jsou nastaveny jako digitální. Zápis výsledku, již výše zmíněný, je pravostranný.

Před zahájením převodu je zapotřebí vyčkat krátkou dobu, po kterou se nabíjí snímací kondenzátor převodníku. Tato doba je zároveň závislá na teplotě čipu. Pro standartní podmínky je tato doba přibližně 20  $\mu$ s. Je-li kondenzátor nabitý, lze zahájit převod pomocí bitu GO/DONE v registru ADCON0.



Obr. 5.5: Časový cyklus převodu analogového signálu na digitální [3]

Po dokončení převodu je vyvoláno přerušení. V přerušovací rutině pro A/D převodník se výsledné slovo porovnává s pomocnými proměnnými. Jsou-li obě části výsledného slova větší nebo rovny pomocným proměnným pro horní mez, pak dosáhl proud zátěže horní hranice nastaveného hysterezního pásma a příslušný tranzistor je vypnut. Jsou-li naopak obě části výsledného slova menší či rovny pomocným proměnným pro dolní mez, pak proud dosáhl spodní hranice hysterezního pásma a tranzistor je sepnut.

Pokud je hodnota výstupního slova mezi horní a spodní mezí, pak je tranzistor ponechán ve stejném stavu, jako při předcházejícím převodu. Po této rozhodovací části je součástí přerušovací rutiny opět vyčkávací doba nabíjení kondenzátoru a spuštění převodu.

Meze pro spínání tranzistoru jsou vypočteny následovně

$$I_+ = I + \frac{1}{2} \cdot |I| \quad (5.7)$$

$$I_- = I - \frac{1}{2} \cdot |I| \quad (5.8)$$

Pomocné proměnné se vypočítávají z obdobně, ale pomocí digitálních hodnot odpovídajících hodnotám reálným, tedy takto

$$I_{+,DIG} = \frac{I_+}{I_{KVANT}} = \frac{I_+}{4,89 \cdot 10^{-3}} = I_+ \cdot 204,5 \quad (5.9)$$

$$I_{-,DIG} = \frac{I_-}{I_{KVANT}} = \frac{I_-}{4,89 \cdot 10^{-3}} = I_- \cdot 204,5 \quad (5.10)$$

přičemž  $I_{KVANT}$  je totožné s  $U_{KVANT}$  vypočteným výše, protože proudové čidlo snímá proud 1:1 vůči napětí, viz Kap. 2.4.

Tyto proměnné, pohybující se v rozmezí  $0 - (2^{10}-1)$  jsou pomocí logických operací rozděleny na dvě části – 2 vyšší bity a 8 nižších bitů, aby bylo možné je porovnávat s digitalizovanými hodnotami skutečného proudu, zapsanými dle Obr. 5.3.

Na pozadí programu běží v nekonečné smyčce kontrola stisku tlačítek BLOK a RESET, a zároveň kontrola vnějšího přerušení blokovací logikou. Z toho vyplývá, že při dvouhodnotovém řízení nelze operativně měnit nastavené parametry měniče.

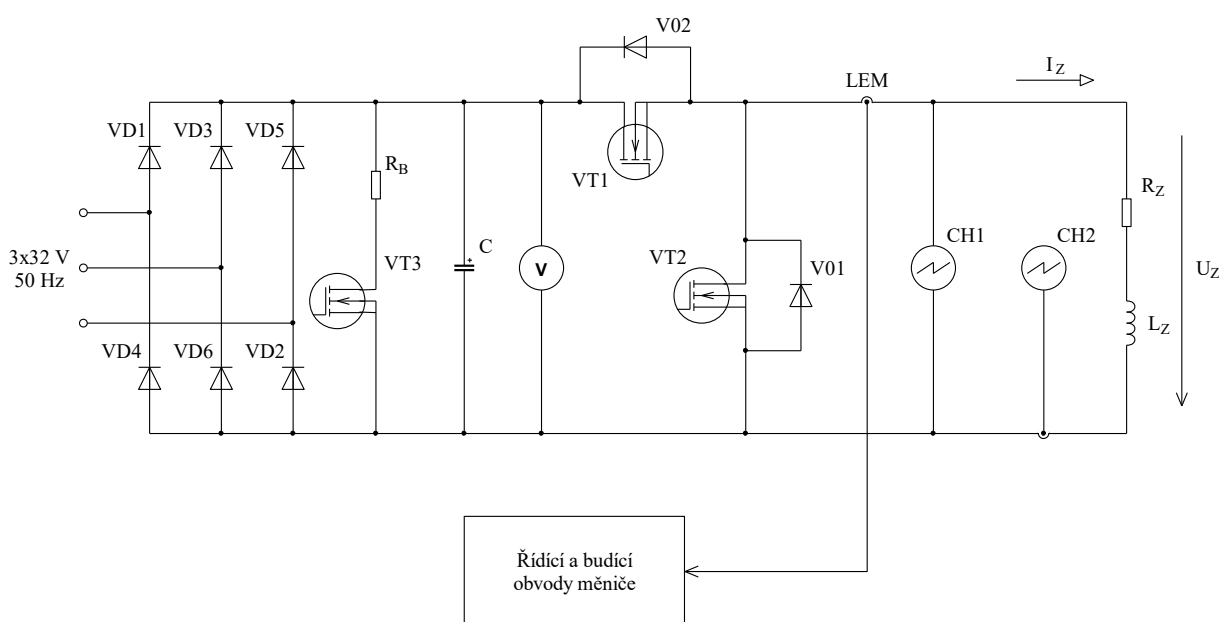
Implicitní nastavení parametrů dvouhodnotového řízení je na referenční hodnotu proudu  $I = 0,5$  A a hodnotu hystereze  $|I| = 100$  mA. Při zablokování měniče zůstane nastavena původní referenční hodnota proudu i velikost hystereze, ovšem v případě, že dojde ke snížení referenční hodnoty proudu na úroveň 1 A, resp. 0,5 A, a předchozí hodnota hystereze byla vyšší, než je u těchto úrovní dovoleno, je hodnota hystereze automaticky snížena na nejvyšší dovolenou hodnotu pro danou referenční hodnotu proudu, tzn. na hodnotu  $|I| = 900$  mA pro  $I = 1$  A, nebo na hodnotu  $|I| = 400$  mA pro  $I = 0,5$  A.

## 6. Ověření funkčnosti řídicí jednotky měřením

Pro ověření funkčnosti navržené a realizované řídicí jednotky je zapotřebí, aby po jejím připojení k blokovacím a budícím obvodům měniče fungoval měnič korektně a dle nastavených požadovaných parametrů.

K tomuto ověření byla zvolena obecná RL zátěž, měnič byl nastaven do režimu pro snižování napětí. Ověření proběhlo ilustračně pro oba typy řízení.

Detailnější měření je uvedeno na snímcích v rámci Přílohy č.3.



Obr. 6.1: Schéma zapojení pulzního měniče pro měření [2]

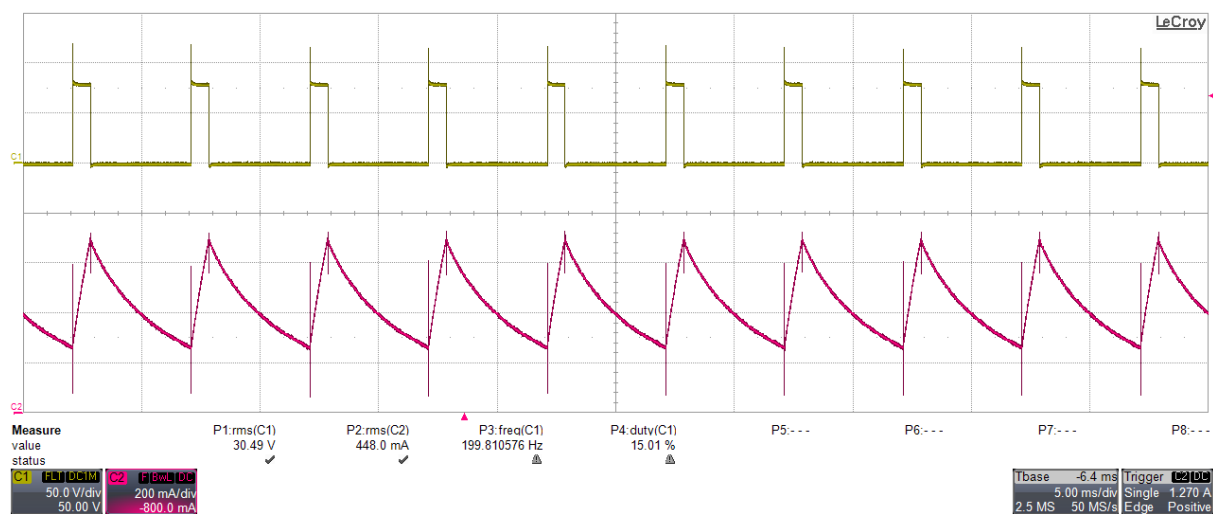
### Použité přístroje a pomůcky:

- Osciloskop Teledyne LeCroy WaveRunner 604Zi
- Proudová sonda k osciloskopu CP030
- Voltmetr – multimetr Agilent U1241A
- Zátěž:
  - o Bezindukční odpor 33  $\Omega$
  - o 2x sériově zapojený vinutý nastavitelný odpor 13  $\Omega$ /6,3 A
  - o Indukčnost 0,172 H/5 A
  - o Indukované protinapětí – soustrojí DC motor-generátor 24 V/2,8 A, 40 W
- 3-fázový oddělovací transformátor s výstupním napětím 3x32 V/ 50 Hz
- Stabilizovaný zdroj pro napájení motor-generátoru Diametral V140R50D
- Brzdňý odpor – 2x sériově zapojený bezindukční odpor 30  $\Omega$

## 6.1 Ověření řízení s konstantní spínací frekvencí

Pro ověření funkčnosti řízení s konstantní spínací frekvencí byly zadány parametry:

- $f_s = 200 \text{ Hz}$
- $z = 0,15$



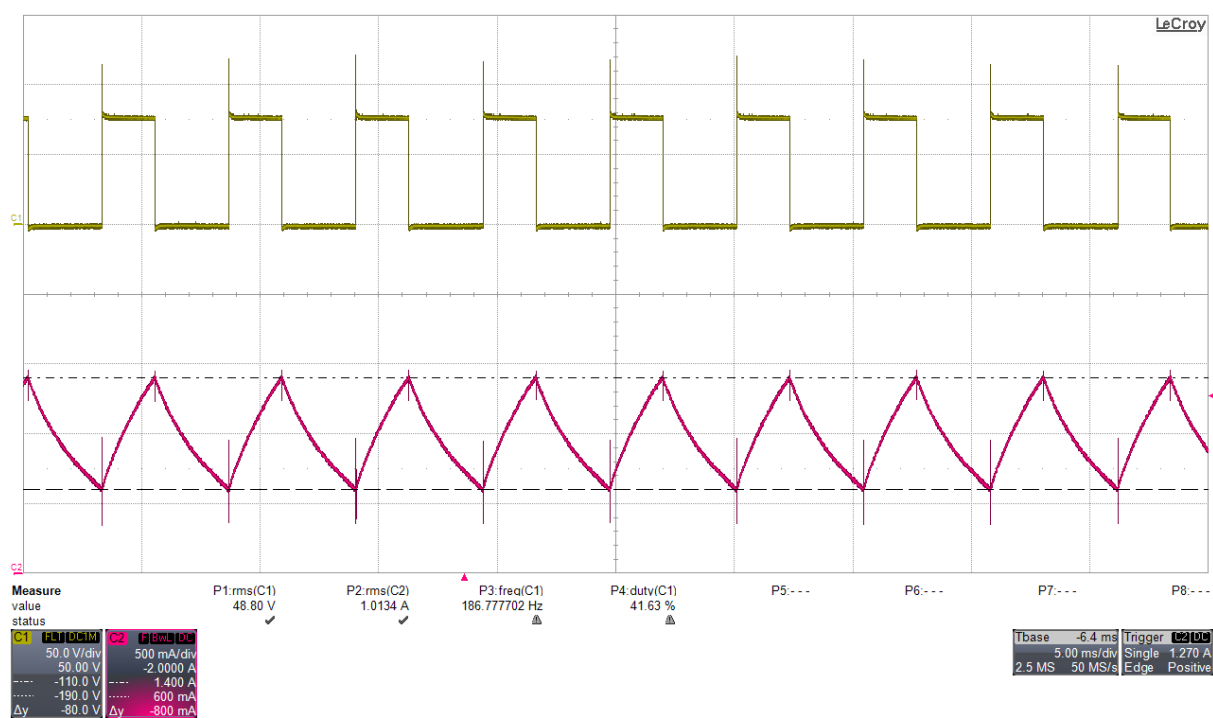
Obr. 6.2: Průběh napětí a proudu zátěže při řízení s konstantní spínací frekvencí  
 $U_Z$  – žlutě,  $I_Z$  – červeně

Z Obr. 6.2 je patrné, že funkčnost řízení s konstantní spínací frekvencí byla potvrzena, měnič fungoval dle zadaných parametrů s poměrně vysokou přesností.

## 6.2 Ověření dvouhodnotového řízení

Pro ověření funkce dvouhodnotového řízení měniče byly zadány parametry:

- $I = 1 \text{ A}$
- $|I| = 800 \text{ mA}$



Obr. 6.3: Průběh napětí a proudu zátěže při dvouhodnotovém řízení  
 $U_z$  – žlutě,  $I_z$  – červeně

Obr. 6.3 potvrzuje funkčnost dvouhodnotového řízení pro zadané parametry.

## Závěr

Funkce navržené a zrealizované řídicí jednotky byla v rámci Kap. 6 a Přílohy č. 3 úspěšně ověřena.

Měnič pracoval s novou řídicí jednotkou korektně a dle nastavených parametrů v obou režimech a pro oba způsoby řízení.

Pro řízení s konstantní spínací frekvencí fungoval měnič dle požadavků v celém rozsahu frekvencí od 100 Hz do 10 kHz i celém rozsahu hodnot zatěživatelé od 0 % do 95 % včetně experimentální hodnoty 99 % pro nižší frekvence (do 5 kHz).

Pro dvouhodnotové řízení měnič rovněž fungoval dle požadovaných parametrů v celém rozsahu od 0,5 A do 4,5 A referenční hodnoty proudu zátěže s proudovou hysterezí od 100 mA do 1 A. Také byla ověřena funkce zakazující nastavení vyšší hodnoty proudové hystereze než referenční hodnoty proudu.

Snímky v Příloze č. 3 a) zobrazují průběhy napětí a proudu zátěže ve všech třech realizovaných frekvenčních pásmech při snižujícím režimu měniče, čtvrtý snímek zobrazuje průběhy při maximální hodnotě zatěživatelé 99 %.

V rámci bodu b) byla při neměnném nastavení parametrů měněna zátěž, přesněji velikost odporu zátěže, měnič ve spolupráci s řídicí jednotkou na tuto změnu dokázal reagovat bez změny referenční hodnoty proudu či jeho zvlnění.

Měřené průběhy bodu c) zobrazují průběhy napětí a proudu zátěže ve všech třech frekvenčních pásmech pro zvyšující pulzní měnič, poslední snímek opět zobrazuje maximální hodnotu zatěživatelé, která je v tomto případě 98 %.

## Seznam použité literatury

[1] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika*. 3., rozš. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2012. ISBN 978-80-261-0143-7.

[2] HRUŠA, Aleš. *Pulsní měnič pro výkonovou elektroniku*. Ostrava, 2002. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.

[3] Microchip Technology Inc. *PIC16F87XA Data Sheet*, [online], 2003 [citováno 30.dubna 2019]. Dostupné z <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>>

[4] Microchip Technology Inc. *MPLAB X IDE* [počítačový program]. Ver. 5.10. 2015 [citováno 30.dubna 2019]. Dostupné z <<https://www.microchip.com/mplab/mplab-x-ide>>. Vývojové prostředí pro programování výrobků firmy Microchip.



## Seznam příloh

### **Příloha č. 1: Předloha pro plošný spoj (3 strany)**

- a) Pohled ze strany spojů a součástek
- b) Rozmístění součástek na desce, soupis použitých součástek

### **Příloha č. 2: Fotodokumentace realizované řídicí jednotky (2 strany)**

- a) Samostatná řídicí jednotka
- b) Řídicí jednotka připojená k měniči

### **Příloha č. 3: Měření na pulzním měniči (9 stran)**

- a) Snižující měnič, odporová zátěž, řízení s konstantní spínací frekvencí
- b) Snižující pulzní měnič, RL zátěž, dvouhodnotové řízení

### **Příloha č. 4: Programové vybavení jednotky, kód v jazyce C (příloha v IS EDISON)**

- a) Zdrojový soubor *LCD\_PWM.c* – hlavní část kódu
- b) Zdrojový soubor *lcd\_hd44780\_pic16.c* – část kódu definující jednotlivé funkce LCD
- c) Hlavičkový soubor *lcd\_hd44780\_pic16.h* – propojení zdrojových souborů pro možnost ovládání LCD v rámci hlavního kódu
- d) Hlavičkový soubor *custom\_char.h* – definice proměnné
- e) Hlavičkový soubor *myutils.h* – definice funkcí ovládání portů
- f) Hlavičkový soubor *xc.h* – definice kompilátoru